



UNIVERSIDAD
DEL VALLE

CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA EL EXPERIMENTO DE REYNOLDS



JAIRO CALDERÓN ANGULO
JAIME MOSQUERA ANACONA
UNIVERSIDAD DEL VALLE

**CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA EL EXPERIMENTO
DE REYNOLDS**

UNIVERSIDAD DEL VALLE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

PROGRAMA ACADÉMICO INGENIERÍA AGRÍCOLA

SANTIAGO DE CALI

MARZO DE 2012

**CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA EL EXPERIMENTO
DE REYNOLDS**

TRABAJO DE GRADO

**JAIRO CALDERON ANGULO
CÓDIGO: 0844317**

**JAIME MOSQUERA ANACONA
CÓDIGO: 0338836**

**DIRECTOR
INGENIERO EFRAÍN DEL RISCO Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

PROGRAMA ACADÉMICO INGENIERÍA AGRÍCOLA

SANTIAGO DE CALI

NOTA DE APROBACIÓN

DIRECTOR

JURADO

JURADO

Santiago de Cali, Marzo 12 de 2012

DEDICATORIA

A mis padres Jaime Mosquera y Aleyda Anacona, quienes con su apoyo constante e incondicional han sido los gestores de este importante logro para mi formación personal y profesional.

A mis amigos por su motivación y su constante respaldo, en especial a Wilmer Mendieta, Víctor Alfonso Santamaría, Andrés Jácome y Christopher Danilo Fernández por sus consejos y su incansable colaboración en distintas circunstancias.

A mi familia y a todas aquellas personas que de una u otra manera se hicieron presentes con su apoyo durante este proceso de formación.

Jaime Mosquera Anacona

DEDICATORIA

A mis padres, Jairo Calderón y Martha Angulo, quienes han sido mi modelo a seguir, brindándome siempre grandes oportunidades en la vida de nivel educativo y personal, con su esfuerzo y apoyo.

A mi hermana Carolina Calderón, a todos mis grandes amigos y mi compañero de tesis, que estuvieron presentes durante este proceso de formación.

Jairo Calderón Angulo

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Efraín Del Risco, jefe del Laboratorio de Fluidos e Hidráulica por su valioso apoyo y colaboración en este proyecto, además por compartir con nosotros su enorme conocimiento en todo momento.

A Hebert Hernández por su constante y valioso apoyo, aparte de su grata compañía antes y durante la elaboración de este trabajo.

A quienes hacen parte del Laboratorio de Fluidos e Hidráulica, por su amplia disposición e infaltable ayuda en las actividades de construcción y desarrollo de este proyecto.

A todos los docentes del programa de Ingeniería Agrícola por su importante aporte en nuestra formación profesional, especialmente a los profesores Jaime Ernesto Díaz y Andrés Echeverry por sus consejos y continua colaboración.

A todas las personas que de una u otra manera hicieron posible el cumplimiento de los logros obtenidos en nuestra carrera.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	3
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1 EL EXPERIMENTO DE REYNOLDS.....	5
1.2 NÚMERO DE REYNOLDS	11
1.3 FLUJO LAMINAR	12
1.3.1 Flujo laminar completamente desarrollado en conductos circulares ..	14
1.4 FLUJO EN TRANSICIÓN	16
1.5 FLUJO TURBULENTO	17
1.5.1 Características generales de los flujos turbulentos	19
1.5.2 Origen de la turbulencia	21
1.5.3 Zonas del régimen turbulento.....	22
1.5.4 Flujo turbulento en conductos circulares	22
1.6 REGÍMENES EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS.....	24
2. MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1 MODELO ORIGINAL DEL EXPERIMENTO DE OSBORNE REYNOLDS	25
2.2 SELECCIÓN DE DISEÑOS	26
2.3 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	27
2.4 APLICACIONES DEL EQUIPO	28
2.5 CALIBRACIÓN	28
2.6 DISEÑO EXPERIMENTAL	29
2.7 MODELO ESTADÍSTICO Y SUS COMPONENTES.....	29
2.7.1 Prueba de Tukey	29
2.7.2 Diferencias Mínimas Significativas	30
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	31
3.1 CONSTRUCCIÓN	31
3.1.1 Actividades de construcción.....	32
3.1.2 Especificaciones del equipo	35

3.2	ENSAYOS EXPERIMENTALES	36
4.	CONCLUSIONES	39
5.	RECOMENDACIONES	40
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
	ANEXOS	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Primer esquema del experimento de Reynolds.	7
Figura 2. Segundo esquema del experimento de Reynolds.	8
Figura 3. Visualización de los regímenes de flujo.	9
Figura 4. a). Régimen laminar observado en experimentos con un número de Reynolds inferior a 2000. b). Estructura laminar resultante de aplicar el método de Newton-Krylov.....	13
Figura 5. a). Régimen en transición observado en experimentos con un número de Reynolds superiores a 2300. b). Estructura preturbulenta resultante de aplicar el método de Newton-Krylov.....	17
Figura 6. a). Régimen turbulento observado en experimentos con números de Reynolds superiores a 15000. b). Estructura turbulenta, el flujo es hacia la derecha. 18	
Figura 7. Detalles de dos chorros turbulentos.....	21
Figura 8. Componentes de velocidad en un flujo turbulento en una tubería.	23
Figura 9. Equipo utilizado por O. Reynolds para establecer el régimen del flujo en tuberías. 25	
Figura 10. Resultados del experimento de Reynolds.....	26
Figura 11. Equipo para el experimento de Reynolds.	27
Figura 12. Componentes del equipo de Reynolds de tubería horizontal.....	31
Figura 13. Cámara experimental y dispositivo de inyección del trazador.	32
Figura 14. Sistema de bombeo y tanque de almacenamiento.	33
Figura 15. Sistema disipador de energía.	34
Figura 16. Lecho de esferas de vidrio.....	34
Figura 17. Rebosadero.	35

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Número de Reynolds en función de la viscosidad dinámica.	6
Ecuación 2. Número de Reynolds en función de la viscosidad cinemática.....	11
Ecuación 3. Ley de la viscosidad de Newton	13
Ecuación 4. Ecuación de Navier-Stokes	14
Ecuación 5. Ecuación de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas.....	14
Ecuación 6. Flujo de Hagen-Poiseuille completamente desarrollado	14
Ecuación 7. Velocidad máxima en flujos completamente desarrollados	15
Ecuación 8. Velocidad media en flujos completamente desarrollados.....	15
Ecuación 9. Caudal en flujos completamente desarrollados.....	15
Ecuación 10. Esfuerzo cortante en la pared de una tubería	15
Ecuación 11. Perfil de velocidad	16
Ecuación 12. Velocidad máxima en flujo laminar completamente desarrollado.....	16
Ecuación 13. Componentes de la velocidad en un flujo turbulento.....	23
Ecuación 14. Promedio temporal	23

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de los caudales críticos de visualización obtenidos.36

Tabla 2. Diferencias entre las medias obtenidas para diferentes caudales.37

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. REGISTRO DE DATOS	44
ANEXO B. VALORES DE LAS MEDIAS OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN.....	53
ANEXO C. VALOR TABULAR ($q\alpha$) PARA LA PRUEBA DE TUKEY	58
ANEXO D. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DEL AGUA (ν) A DIFERENTES TEMPERATURAS (T).....	59
ANEXO E. PROPIEDADES FÍSICAS DEL HIPOCLORITO DE SODIO	60
ANEXO F. USOS, GENERACIÓN Y CONTROL DEL HIPOCLORITO DE SODIO.....	61
ANEXO G. CURVAS Y DATOS DE PRESTACIÓN DE LA BOMBA.....	62
ANEXO H. REGISTRO FOTOGRÁFICO	63
ANEXO I. GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	66

RESUMEN

En el laboratorio de Fluidos e Hidráulica de la Universidad del Valle, se construyó un banco experimental para el estudio y visualización del experimento de Osborne Reynolds en una sección de tubería de vidrio en posición horizontal, con el fin de brindar una herramienta didáctica y de investigación a los estudiantes de los distintos programas relacionados con el estudio de la mecánica de fluidos; la construcción se realizó teniendo en cuenta el diseño original y otros diseños similares desarrollados en el campo de la investigación para el estudio del Número de Reynolds a nivel de laboratorio.

El equipo consta de una cámara experimental hecha en acrílico, tubería de vidrio abocinada, un lecho de esferas de vidrio que permiten un ascenso ordenado del flujo recirculado, un sistema inyector de trazador, y una lamina de acrílico en el interior que mejora la visualización de los regímenes de flujo.

Para la calibración del equipo se realizaron pruebas simulando las condiciones expresadas en el Experimento de Osborne Reynolds en un tubo horizontal, estableciendo una carga constante durante cada una de las 3 repeticiones efectuadas, a distintas aperturas de la válvula de control. Luego de analizar estadísticamente los resultados a través del método de Diferencias Mínimas Significativas (DMS) se encontró que con distintos valores de Número de Reynolds, los resultados teóricos concuerdan con los experimentales y no se presentan variaciones significativas.

PALABRAS CLAVES:

- Equipo de Reynolds.
- Número de Reynolds.
- Osborne Reynolds.
- Flujo Laminar.
- Flujo Turbulento.

INTRODUCCIÓN

El trabajo de Osborne Reynolds ha mostrado que la naturaleza del flujo en tuberías es de carácter ordenado o desordenado, con una zona intermedia, las cuales dependen del diámetro del tubo, velocidad del flujo, densidad y viscosidad del fluido en movimiento.

El valor numérico de la combinación de estas cuatro variables es conocido como Número de Reynolds, que es de carácter adimensional, considerado como la relación de la fuerza de inercia a la fuerza viscosa.

Para propósitos de ingeniería el flujo en tuberías es comúnmente considerado laminar si el Número de Reynolds es menor a 2000, turbulento si es mayor que 4000. Entre estos dos valores se encuentra la “zona crítica”, conocida también como zona de flujo de transición. Donde la viscosidad juega un papel importante debido a que causa esfuerzos cortantes cuando estos se encuentran en circulación, generando pérdidas de energía. Por otra parte el flujo en una tubería produce pérdidas de presión debido a su rugosidad y diámetro.

Debido a la limitación existente de observar directamente el tipo de flujo en una tubería cerrada, es necesario el Número de Reynolds como un punto de partida para caracterizar el flujo que circula a través de ella.

Se construyó un equipo de tramo horizontal similar al equipo utilizado en los primeros experimentos de Osborne Reynolds. De gran importancia para la implementación práctica en los sistemas de transporte en tuberías cerradas, donde los estudiantes pueden estudiar e identificar el comportamiento del flujo; además, es una contribución al laboratorio con el fin de brindar una herramienta funcional de apoyo a futuras investigaciones. Este equipo permite verificar la existencia del flujo laminar, de transición y turbulento, estos flujos son determinados por el Número de Reynolds el cual es fundamental para caracterizar la naturaleza del flujo y así poder calcular la cantidad de energía pérdida en el sistema debido a la fricción.

El objetivo principal de este trabajo radica en construir y calibrar un equipo para el estudio y observación de los diferentes tipos de flujos en tuberías cerradas, mediante la demostración del experimento de Osborne Reynolds en un tubo horizontal.

Los objetivos específicos son:

- Construir un equipo para realizar el experimento de Osborne Reynolds.
- Realizar el experimento de Osborne Reynolds en el equipo construido.
- Representar y estudiar el comportamiento de los diferentes tipos de flujos: laminar, transición y turbulento bajo diferentes condiciones de operación del equipo.
- Determinar experimentalmente el número de Reynolds y la velocidad de circulación del fluido en el interior de la tubería de vidrio del equipo.
- Implementar un sistema eficiente de recirculación y filtración de agua en el equipo, que permita retirar el trazador utilizado en el experimento.
- Elaborar una guía de laboratorio, para que los estudiantes realicen prácticas en el equipo sobre la obtención del número de Reynolds.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 EL EXPERIMENTO DE REYNOLDS

Los primeros experimentos cuidadosamente documentados del rozamiento en flujos de baja velocidad a través de tuberías fueron realizados independientemente en 1839 por el fisiólogo francés Jean Louis Marie Poiseuille, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre, y en 1840 por el ingeniero hidráulico alemán Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones matemáticas se debió al ingeniero francés Claude Louis Marie Navier en 1827, e independientemente al matemático británico George Gabriel Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como ecuaciones de Navier-Stokes, y son tan complejas que sólo se pueden aplicar a flujos sencillos. Uno de ellos es el de un fluido real que circula a través de una tubería recta. El teorema de Bernoulli no se puede aplicar aquí, porque parte de la energía mecánica total se disipa como consecuencia del rozamiento viscoso, lo que provoca una caída de presión a lo largo de la tubería. Las ecuaciones sugieren que, dados una tubería y un fluido determinados, esta caída de presión debería ser proporcional a la velocidad de flujo. Los experimentos realizados por primera vez a mediados del siglo XIX demostraron que esto sólo era cierto para velocidades bajas; para velocidades mayores, la caída de presión era más bien proporcional al cuadrado de la velocidad (SALDARRIAGA, 2001).

Aunque las ecuaciones de la hidrodinámica sean aplicables al movimiento directo o sea sin remolinos, mostrando que la resistencia es proporcional a la velocidad; hasta ahora no han arrojado ninguna luz sobre las circunstancias de las cuales depende dicho movimiento. Las ecuaciones se han aplicado a la teoría del torbellino, pero no al movimiento del agua que es una masa de remolinos y tampoco han ofrecido una solución a la pregunta, por qué la resistencia al movimiento varía con el cuadrado de la velocidad. Así Reynolds presentaba en 1883 el dilema que se menciona anteriormente, en su extenso trabajo titulado: *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels*; y agregaba: “Cuando se aplican las ecuaciones al movimiento de las olas y al movimiento del agua en tubos capilares, los resultados teóricos concuerdan con los experimentales (LEVI, 1985).

La condición natural del flujo era para Reynolds, no el orden sino el desorden y la viscosidad es el agente que se ocupa en destruir continuamente las perturbaciones; una fuerte viscosidad puede contrarrestarse con una gran velocidad. Cuando Reynolds concluye la investigación sobre la transpiración de los gases, en la cual estableció que la ley de transpiración depende de la relación entre el tamaño del conducto y el recorrido medio de las moléculas gaseosas, animado por el éxito del análisis de la transpiración realizado bajo el punto de vista dimensional resolvió utilizar dicho análisis también en el estudio de los regímenes de flujo de agua. Acudiendo a las ecuaciones fundamentales del movimiento que habían sido desarrolladas con mucho rigor por el profesor Stokes (LEVI, 1985).

Las ecuaciones del movimiento de un fluido a presión constante equilibran el efecto de inercia, representado por la energía cinética por unidad de volumen (ρU^2), con el viscoso representado por el esfuerzo de Newton ($\mu U/c$), donde U es la velocidad media y c una longitud característica de la corriente en estudio (el diámetro del tubo, por ejemplo), como la energía específica y el esfuerzo tienen las mismas dimensiones (Ecuación 1).

$$\frac{\rho U^2}{\mu U/c} = \frac{\rho}{\mu} U c$$

Ecuación 1. Número de Reynolds en función de la viscosidad dinámica.

Dónde:

ρ : Densidad

U : Velocidad media.

μ : Viscosidad dinámica.

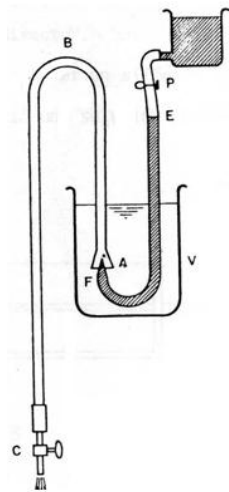
c : Longitud característica de la corriente en estudio.

Su cociente resulta ser un parámetro sin dimensiones, capaz de cuantificar la importancia relativa de las variables mencionadas: un valor pequeño indica que los efectos viscosos prevalecen, con lo que el escurrimiento será probablemente directo, un valor grande indica que predomina la inercia sugiriendo un comportamiento sinuoso. Debe existir un valor intermedio concluía Reynolds, que separe los dos regímenes y éste identificará no sólo la velocidad crítica, conociéndose la velocidad media y la longitud característica, sino también la viscosidad y la longitud críticas dados los valores de los otros dos parámetros. Había ahora que acudir al experimento para confirmar esta previsión (LEVI, 1985).

Un problema hidrodinámico que había cautivado a Reynolds era el funcionamiento de las hélices de barco, tornillos que se enroscan en el agua; lo que más le intrigaba de la hélice era su acción sobre el agua. Tenía ciertas ideas al respecto pero el experimento revelaba todo lo contrario, fue en esa ocasión que se le ocurrió inyectar tras la hélice agua coloreada y descubrió al responsable: un vórtice que allí se había formado y que constituía la clave de casi todos los problemas de movimiento interno de los fluidos (LEVI, 1985).

Así se propuso determinar bajo qué condiciones se produce el escurrimiento directo y cuando el sinuoso, el directo se caracteriza por la presencia de remolinos y el otro no, la primera idea que se le ocurrió fue volver a visualizar con colorante. Construyó un tubo de vidrio de 6 mm de diámetro, instaló un sifón ABCD (figura 1). La entrada del sifón era abocinada en A y tenía una válvula de control en C. Lleno de agua el sifón, e introdujo su brazo corto AB en el agua de un vaso V, por el otro lado instaló un depósito de líquido coloreado D provisto de un tubo EF, también de 6 mm terminado en una angosta boquilla cónica que penetraba en el centro de la boca A. El suministro de este líquido se controlaba por medio de la pinza P (LEVI, 1985).

Figura 1. Primer esquema del experimento de Reynolds. (Tomado de: LEVI, 1985).

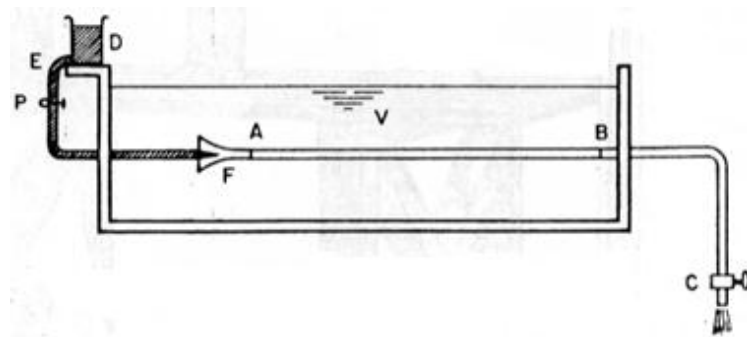


Luego de dejar todo el sistema lleno de agua en reposo durante varias horas para asegurarse de que todo movimiento interno cesara, se abría poco a poco la pinza. El líquido coloreado salía de la boquilla F, primero adquiriendo la forma de la llama de una vela y luego alargándose hasta volverse un filamento muy delgado que al permitirse el descargue en C se extendía por todo el sifón. A la válvula C se le

daban aperturas siempre mayores, para que aumentara la velocidad del agua en el sifón y al mismo tiempo se incrementaba el suministro de colorante, a fin de que el filete se mantuviera visible. Contrariamente a lo previsto con la máxima abertura de la válvula, el colorante se mantenía todavía perfectamente claro y estable a lo largo de todo el tubo, sin la menor presencia de perturbaciones en la corriente. Se prolongó el brazo BC hasta casi tocar el piso, para aumentar aún más la velocidad; pero el filete no se alteraba en lo más mínimo (LEVI, 1985).

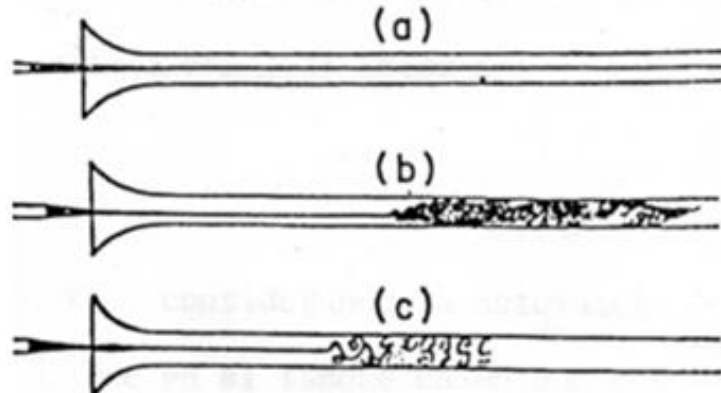
Evidentemente el diámetro de un cuarto de pulgada escogido para el sifón, era demasiado reducido y el flujo no pasaba de directo. Entonces Reynolds decidió emplear un tubo de una pulgada, pero hacer un sifón de vidrio de este diámetro no era fácil y se le ocurrió una solución mucho más simple, esquematizada en la figura 2, donde el tanque V de seis pies de largo, uno y medio de ancho y otro tanto de profundidad, se ve levantado siete pies por encima del piso con el fin de alargar considerablemente el brazo vertical de la tubería de hierro que prolongaba al otro lado de la pared del tanque, el tubo de vidrio AB con el cual se realizaba el experimento (LEVI, 1985).

Figura 2. Segundo esquema del experimento de Reynolds. (Tomado de: LEVI, 1985).



El primer ensayo se realizó el 22 de febrero de 1880, donde se permitió al tinte fluir muy despacio y se abrió un poco la válvula, el filamento coloreado se estableció como antes (figura 3a) y permaneció estable al crecer la velocidad; hasta que de repente con una leve apertura posterior de la válvula en un punto situado a dos pies antes del tubo de hierro, el filamento se expandió y se mezcló con el agua hasta llenar el resto del conducto con una nube coloreada (figura 3b) que a primera vista parecía como de tinte uniforme (LEVI, 1985).

Figura 3. Visualización de los regímenes de flujo. (Tomado de: LEVI, 1985).



Sin embargo, un examen más cuidadoso reveló la naturaleza de esa nube, siguiendo el avance de la corriente, la expansión del filete coloreado se deshizo en un movimiento ondulatorio del filamento bien definido, primero sin mayores disturbios y después de dos o tres ondas (figura 3c) apareció una secuencia de remolinos aislados y perfectamente claros (LEVI, 1985).

Se habían producido en un mismo tubo, con sólo variar la velocidad del flujo los dos regímenes directo y sinuoso. Pero el mismo resultado debía conseguirse calentando el agua y así reducir su viscosidad, el cuarto donde se realizaron los experimentos estaba a una temperatura de 8.3°C , y ésta era también la temperatura del agua. Con un chorro de vapor, Reynolds consiguió elevar la temperatura a 21° , reduciendo en 1.39 veces la viscosidad. Aumentando poco a poco la velocidad determinó en ambos casos, el valor crítico con el cual empezaba a trastornarse el movimiento directo, y encontró que en el sinuoso la velocidad crítica era 1.45 veces más grande que en el directo (LEVI, 1985).

Aunque esta concordancia fuese aceptable considerando la naturaleza del ensayo, Reynolds quedó con la idea de que en el tanque calentado debían manifestarse algunas perturbaciones adicionales: unas podían resultar de la diferencia de temperatura entre el agua y el medio ambiente, por lo que la superficie libre del agua y aquellas en contacto con las paredes sufrirían un enfriamiento, que a su vez podía crear una circulación dentro del tanque. Otras perturbaciones podían deberse al gradiente de temperatura en el tanque mismo, ya que la temperatura en el fondo llegaba a ser hasta de 5°C más alta que en la superficie. Reynolds prefirió enfriar el agua hasta su máxima densidad ó sea hasta los 4°C , agregándole hielo, el experimento comprobó que en todos los casos sí existe una velocidad crítica, y que ésta variaba en proporción directa con la

viscosidad del flujo. Por otro lado, ensayos realizados con tubos de una pulgada, media, y un cuarto, permitieron concluir que la velocidad mencionada es inversamente proporcional al diámetro D del tubo, confirmándose así que el flujo directo empieza alterándose por un valor bien definido del parámetro $\rho UD/\mu$, donde ρ = densidad, U = velocidad media, D = longitud característica de la geometría y μ = viscosidad dinámica (LEVI, 1985).

Esto sugería que si existiera una velocidad crítica, a la cual para cualquier perturbación el agua se estabilizaba, esa velocidad era mucho menor que aquella con la cual se desestabilizaría para perturbaciones infinitamente pequeñas, ó en otros términos sugería la existencia de dos valores críticos para la velocidad en el tubo: el primero cuando el movimiento estable se cambia a remolinos y el segundo cuando los remolinos se cambian en movimiento estable. Comprobando de esta forma la ley de resistencia, si esta era proporcional a la velocidad media en cuyo caso el flujo era directo, o bien a su cuadrado evidenciando que el flujo era sinuoso (LEVI, 1985).

Estos ensayos realizados bajo condiciones distintas le permitieron a Reynolds confirmar que su previsión era correcta, aun cuando llegó a la conclusión de que para flujo sinuoso la resistencia que el conducto ofrece al avance de la corriente no es proporcional al cuadrado, sino a la potencia de exponente 1.722, de la velocidad. Los nombres directo y sinuoso no le gustaron a la posteridad, que los convirtió en laminar y turbulento (LEVI, 1985).

Reynolds observa que al aumentar el caudal (aumento de velocidad), el punto de mezcla se corre aguas arriba y eventualmente la zona de inestabilidad desaparece. Sin embargo, si sigue aumentando el caudal (Q), el punto de mezcla se corre hasta un máximo en donde se detiene; para todo Q hay una zona donde la tinta no se mezcla (SALDARRIAGA, 2001).

El parámetro $\rho UD/\mu$ se llamó Número de Reynolds, y ha resultado de tanta importancia y utilidad que hoy en día no hay nadie que estudie Mecánica de Fluidos, que no mencione a la par el nombre de Reynolds con el de Bernoulli (LEVI, 1985).

1.2 NÚMERO DE REYNOLDS

Reynolds en 1883 estudio las características de movimiento de los fluidos, inyectando un trazador dentro de un líquido que fluía por una tubería. A velocidades bajas del líquido, el trazador se mueve linealmente en la dirección axial, sin embargo a mayores velocidades las líneas del flujo se desorganizan y el trazador se dispersa rápidamente después de su inyección en el líquido. El flujo lineal del trazador se denomina laminar y el flujo desordenado obtenido a mayores velocidades del líquido se denomina turbulento (PARDO, 2000).

Las características que condicionan el flujo laminar dependen de las propiedades del líquido y de las dimensiones del tubo. Conforme aumenta el flujo másico se presenta un aumento en las fuerzas del momento ó inercia, las cuales son contrarrestadas por la fricción o fuerzas viscosas dentro del líquido que fluye, cuando estas fuerzas opuestas alcanzan un cierto equilibrio se producen cambios en las características del flujo. Con base a los experimentos realizados por Reynolds se concluyó que las fuerzas del momento son función de la densidad, del diámetro de la tubería y de la velocidad media, además la fricción o fuerza viscosa depende de la viscosidad del líquido. Según dicho análisis el número de Reynolds se definió como la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas o de rozamiento, midiendo así la importancia de la disipación de energía por efectos viscosos (PARDO, 2000).

$$Re = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu} = \frac{V_{prom} D}{\nu}$$

Ecuación 2. Número de Reynolds en función de la viscosidad cinemática

Dónde:

V_{prom} = Velocidad de flujo promedio (m/s).

D = Longitud característica de la geometría (m).

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ = viscosidad cinemática del fluido (m²/s).

Cuando el flujo está representado por un número de Reynolds grande significa que los efectos viscosos son relativamente poco significativos y contribuyen escasamente a la disipación de energía; un número de Reynolds pequeño significa que las fuerzas viscosas dominan y son el mecanismo principal de disipación de energía (LEVENSPIEL, 1993). Por lo tanto el flujo es turbulento en el primer caso y laminar en el segundo, el número de Reynolds en donde el flujo se

vuelve turbulento se llama número de Reynolds crítico, este valor es diferente para geometrías y condiciones de flujo distintas, para flujo interno en una tubería circular el valor generalmente aceptado del número de Reynolds crítico es $Re_{cr}=2300$ (CENGEL Y CIMBALA, 2007).

La ecuación 2, denominada número de Reynolds es una cantidad adimensional que permite predecir y reconocer el tipo de flujo que se tiene en cada problema sin necesidad de observarlo, más aún la observación directa es imposible para fluidos que van por tubos opacos, donde solo se puede verificar de modo analítico (MOTT, 2006).

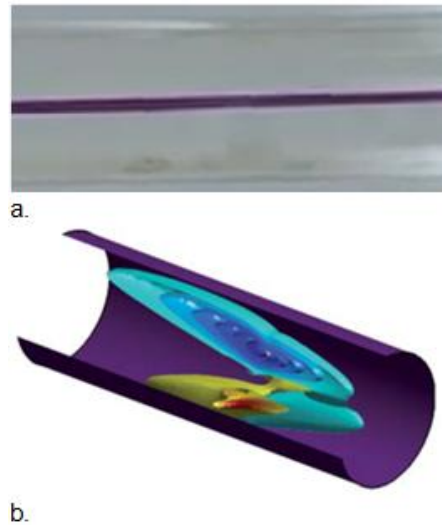
Reynolds repitió su experimento tanto con diferentes diámetros de tubería como fluidos, encontrando resultados similares (SALDARRIAGA, 2001). Lo cual demuestra que no es un cierto valor de la viscosidad o de la velocidad, lo que condiciona el tránsito de régimen laminar o turbulento, sino un cierto valor de la relación $vD/\nu = Re$, donde v es la velocidad media, D es el diámetro de la tubería y ν la viscosidad cinemática (MATAIX, 1986).

1.3 FLUJO LAMINAR

Para Cengel y Cimbala (2007), el flujo laminar se caracteriza por líneas de corriente suaves y movimiento sumamente ordenado como se observa en la figura 4. El movimiento de las partículas del fluido se produce siguiendo trayectorias bastante regulares, paralelas y perfectamente definidas, el gradiente de velocidades es diferente de cero, el perfil de velocidad es una curva de forma suave y el fluido se mueve a lo largo de líneas de corriente de aspecto aislado (STREETER, 2000).

El flujo se denomina laminar porque aparece como una serie de capas delgadas de fluido (láminas) que se deslizan unas sobre otras con el mismo sentido, dirección y magnitud. En tuberías de sección circular, si se hace un corte transversal, las capas de igual velocidad se disponen de forma concéntrica con $v=0$ junto a las paredes de la tubería y velocidad máxima en el centro. Corresponde entonces el régimen laminar a bajos valores del número de Reynolds y suele darse a pequeñas velocidades, en tubos con pequeño diámetro y con fluidos muy viscosos (aceites) (STREETER, 2000). La viscosidad del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a la turbulencia (GILES, 1995).

Figura 4. a). Régimen laminar observado en experimentos con un número de Reynolds inferior a 2000. b). Estructura laminar resultante de aplicar el método de Newton-Krylov. (Tomado de: Meseguer y Mellibovsky, 2010).



Los experimentos realizados en tuberías suficientemente largas, en condiciones de extrema precisión (evitando el ruido externo y controlando la temperatura del fluido), han podido mantener la laminaridad hasta números de Reynolds cercanos a $Re \sim 20.000$. Otros trabajos experimentales han estudiado los efectos de perturbaciones de gran amplitud (con la introducción de ruido externo) y han podido así reducir el número de Reynolds hasta el orden de $Re \sim 2000$ (MESEGUER Y MELLIBOVSKY, 2010).

La ley de la Viscosidad de Newton es la que rige el flujo laminar:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Ecuación 3. Ley de la viscosidad de Newton

Dónde:

τ : Esfuerzocortante.

μ : Viscosidad dinámica absoluta.

$\frac{dv}{dy}$: Velocidad de deformación o rapidez

Esta ley establece la relación existente entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación angular (STREETER, 2000).

1.3.1 Flujo laminar completamente desarrollado en conductos circulares

La solución exacta más útil de las Ecuaciones de Navier-Stokes corresponde al flujo incompresible en un conducto recto de sección circular de radio R, estudiado experimentalmente por primera vez por G. Hagen en 1839 y por J. L. Poiseuille en 1840. Cuando se hace referencia al flujo completamente desarrollado, la región en estudio está suficientemente lejos de la entrada como para que el flujo sea puramente axial, $v_z \neq 0$, mientras que v_r y v_θ son nulas, y las variaciones de densidad son despreciables entonces $\partial\rho/\partial t=0$, independientemente de que el flujo sea estacionario o no, la densidad puede sacarse fuera de la divergencia en la Ecuación 4. El resultado es válido para flujo incompresible estacionario y no estacionario. Su forma en el sistema de coordenadas cilíndricas se aprecia en la Ecuación 5 (WHITE, 2004):

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0$$

Ecuación 4. Ecuación de Navier-Stokes

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z) = 0$$

Ecuación 5. Ecuación de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas

Dónde:

ρ : Densidad.

t : Tiempo.

r : Distancia radial desde el eje.

θ : Ángulo de rotación alrededor del eje.

v : Velocidad.

∇ : Operador gradiente.

$$v_z = \left(-\frac{dp}{dz} \right) \frac{1}{4\mu} (R^2 - r^2)$$

Ecuación 6. Flujo de Hagen-Poiseuille completamente desarrollado

Dónde:

v_z : Perfil de velocidad.

r : Distancia radial desde el eje.

μ : Viscosidad dinámica absoluta.

R: Sección circular.

p: Presión.

El perfil de velocidades es un paraboloide que cae a cero en la pared y alcanza su máximo en el eje, una vez conocida la distribución de velocidades se obtiene inmediatamente el resto de resultados (WHITE, 2004):

$$V_{m\acute{a}x} = v_z(r = 0) = \left(-\frac{dp}{dz}\right) \frac{R^2}{4\mu}$$

Ecuación 7. Velocidad máxima en flujos completamente desarrollados

$$V_{med} = \frac{1}{A} \int v_z dA = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R V_{m\acute{a}x} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) 2\pi r dr = \frac{V_{m\acute{a}x}}{2} = \left(-\frac{dp}{dz}\right) \frac{R^2}{8\mu}$$

Ecuación 8. Velocidad media en flujos completamente desarrollados

$$Q = \int v_z dA = \int_0^R V_{m\acute{a}x} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) 2\pi r dr = \pi R^2 V_{med} = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left(-\frac{dp}{dz}\right) = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L}$$

Ecuación 9. Caudal en flujos completamente desarrollados

$$\tau_{pared} = \mu \left| \frac{\partial v_z}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{4\mu V_{med}}{R} = \frac{R}{2} \left(-\frac{dp}{dz}\right) = \frac{R \Delta p}{2 L}$$

Ecuación 10. Esfuerzo cortante en la pared de una tubería

Dónde:

v_z : Componente de la velocidad.

r : Distancia radial desde el eje.

μ : Viscosidad dinámica absoluta.

A : Área de la sección transversal.

V : Velocidad del flujo.

L : Longitud de la tubería.

Q : Caudal circulante.

R : Sección circular.

p : Presión.

Obsérvese que se ha utilizado la igualdad $(-dp/dz) = \Delta p/L$, donde Δp es la caída de presión a lo largo de la longitud total L del tubo.

Estas fórmulas son válidas siempre que el flujo sea laminar, esto es siempre que el número de Reynolds del flujo, $Re_D = \rho V_{med}(2R)/\mu$ sea menor que 2300.

Obsérvese también que las fórmulas no dependen de la densidad, debido a que la aceleración convectiva del flujo es nula (WHITE, 2004).

Cuando se combinan las Ecuaciones 6 y 8, el perfil de velocidad se reescribe como:

$$v_z = 2V_{med} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

Ecuación 11. Perfil de velocidad

Dónde:

v_z : Componente de la velocidad.

r : Distancia radial desde el eje.

V : Velocidad del flujo.

R : Sección circular.

Esta es una forma conveniente para el perfil de velocidad, por que V_{med} se puede determinar fácilmente a partir de la información de la razón de flujo. La velocidad máxima ocurre en la línea central y se determina a partir de la Ecuación 14 cuando se sustituye $r = 0$. En consecuencia, la velocidad promedio en flujo laminar totalmente desarrollado en tubería es la mitad de la velocidad máxima (CENGEL Y CIMBALA, 2007).

$$V_{m\acute{a}x} = 2V_{med}$$

Ecuación 12. Velocidad máxima en flujo laminar completamente desarrollado.

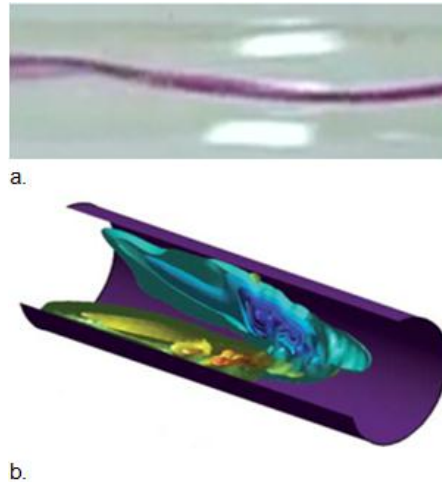
Dónde:

V : Velocidad del flujo.

1.4 FLUJO EN TRANSICIÓN

En el rango de números de Reynolds entre 2000 y 4000 es imposible predecir que flujo existe; por tanto se le denomina región crítica o de transición (MOTT, 2006). Cuando el filamento de tinta comienza a hacerse inestable, con una ondulosidad manifiesta, como se puede observar en la figura 5. El caudal para el cual este fenómeno empieza a ocurrir depende de las condiciones del experimento; por ejemplo, si la turbulencia remanente (grado de aquietamiento del agua) en el tanque de entrada es baja, la transición demora en presentarse. Lo contrario ocurre si el grado de aquietamiento inicial es mínimo. Esto se presenta tanto para caudales relativamente bajos como para caudales relativamente altos (SALDARRIAGA, 2001).

Figura 5. a). Régimen en transición observado en experimentos con un número de Reynolds superiores a 2300. b). Estructura preturbulenta resultante de aplicar el método de Newton-Krylov. (Tomado de: Meseguer y Mellibovsky, 2010).



Según Cengel y Cimbala (2007), la transición de flujo laminar a turbulento no ocurre repentinamente; más bien, sucede sobre cierta región en la que el flujo fluctúa entre flujos laminar y turbulento antes de volverse totalmente turbulento. En resumen, la transición en el Problema de Reynolds es muy sensible a la magnitud de las perturbaciones externas, susceptibilidad que aumenta con el número de Reynolds (MESEGUER Y MELLIBOVSKY, 2010).

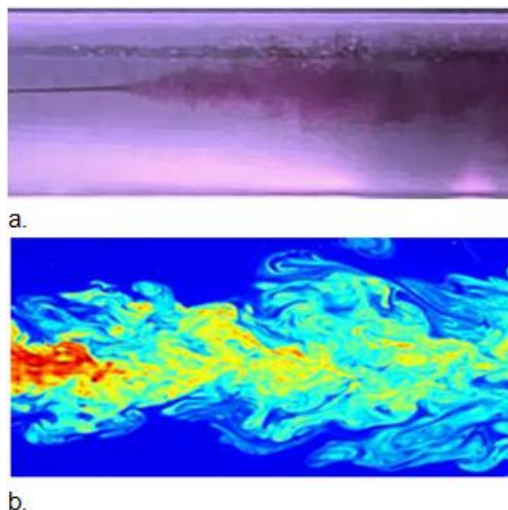
Las aplicaciones prácticas involucran flujos que se encuentran bien dentro del rango laminar o bien dentro del rango turbulento, por lo que la existencia de dicha región de incertidumbre no ocasiona demasiadas dificultades. Si se encuentra que el flujo en un sistema se halla en la región crítica, la práctica usual es cambiar la tasa de flujo o diámetro del tubo para hacer que el flujo sea en definitiva laminar o turbulento. Entonces es posible realizar análisis más precisos (MOTT, 2006).

1.5 FLUJO TURBULENTO

Cuando se tiene un gradiente de velocidad pero con zonas de alta velocidad, las fuerzas viscosas pierden valor relativo respecto a las fuerzas de inercia. En estas condiciones una perturbación que altere puntualmente el equilibrio entre la rotación relativa alrededor de cada partícula y la deformación propiamente dicha, no logra ser atenuada por las fuerzas viscosas, sino que crece y da origen a un

remolino arrastrado por la corriente. A su vez la presencia de un remolino supone nuevos gradientes de velocidad, por lo que a partir de ese remolino se pueden originar otros remolinos de tamaño más pequeño. El proceso de generación de nuevos remolinos de menor escala finaliza al alcanzar tamaños en los que los gradientes de velocidad asociados (que crecen al disminuir la escala de los remolinos) se corresponden con fuerzas viscosas dominantes sobre las de inercia; estas escalas de tamaño mínimo reciben el nombre de escalas de Kolmogorov, tras los trabajos del científico ruso Andrei Nikolaevich Kolmogorov publicados en 1941. Así pues el flujo pasa a estar compuesto por un movimiento en la dirección principal más una sucesión de remolinos de distintas escalas superpuestos entre sí, de modo que cada partícula ya no realiza una trayectoria rectilínea, sino que su rumbo se ve continuamente alterado por la sucesión de remolinos como se puede visualizar en la figura 6. Este es el tipo de flujo denominado turbulento (UNIVERSIDAD DE OVIEDO, 2006).

Figura 6. a). Régimen turbulento observado en experimentos con números de Reynolds superiores a 15000. b). Estructura turbulenta, el flujo es hacia la derecha. (Foto tomada por la Universidad Técnica en Delft, Holanda, uso libre).



El flujo turbulento es muy común, tanto en la naturaleza (flujo en ríos, atmósfera, volcanes, etc.) como en aplicaciones de ingeniería (cámaras de combustión, intercambiadores, turbomáquinaria, reactores químicos, flujo en tuberías), hasta el punto que la mayoría de los flujos de interés tecnológico resultan ser turbulentos. Dado que la turbulencia modifica significativamente parámetros tales como la resistencia a la fricción, la transmisión de calor o la capacidad de mezcla, es necesario estudiarlos y caracterizarlos (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

La gran importancia de estos flujos contrasta con su complejidad, que hace muy difícil un estudio tanto experimental como teórico. No existe una teoría completa del fenómeno, algunos autores afirman que la turbulencia y más aún la transición de flujo laminar a turbulento, constituye el único gran problema de la física clásica sin resolver. Durante la segunda mitad del siglo XX se ha llegado a caracterizar la turbulencia mediante el uso de métodos de visualización de flujos, el desarrollo de nuevos instrumentos de medida y la aplicación del computador a la solución de las ecuaciones del movimiento. Con toda esta información se han llegado a perfeccionar modelos teóricos parciales que permiten resolver problemas de flujos turbulentos de casos prácticos, incluso con geometrías complejas, mediante el uso de códigos de cálculo numérico, aunque para ello se han de incluir en los códigos algunos parámetros empíricos (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

1.5.1 Características generales de los flujos turbulentos

No existe una definición exacta de la turbulencia sin embargo en general, todo el mundo tiene una idea de lo que es un movimiento turbulento, cualquiera podría describirlo como un movimiento fluctuante y desordenado, alcanzándose a distinguir de un movimiento laminar, de hecho el término “turbulento” forma parte del lenguaje cotidiano asociado al desorden. Ante la carencia de una definición precisa de la turbulencia se opta por describirla enumerando las propiedades más destacadas que poseen los flujos turbulentos (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

- **Irregularidad**

Quizás sea la característica más evidente para cualquier observador. La irregularidad se presenta tanto en el espacio, como en el tiempo y en magnitudes fluido-dinámicas tales como la velocidad, la presión, la temperatura y la composición. Estas irregularidades espaciales y temporales tienen características propias que no se corresponden con las del ruido. A pesar de ser un fenómeno determinista, los flujos turbulentos parecen irregulares, caóticos e impredecibles. Lo que justifica el uso de métodos estadísticos para su estudio (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

- **Elevados valores del número de Reynolds**

La turbulencia aparece siempre cuando el número de Reynolds característico del problema ($Re = DV/v$) es muy grande. De hecho es uno de los parámetros que se utilizan para distinguir entre flujo laminar y turbulento. La turbulencia

frecuentemente se origina como una inestabilidad de los flujos laminares. Del análisis de la estabilidad de soluciones de flujos laminares se evidencia que la solución se hace inestable a partir de un cierto valor del número de Reynolds, denominado valor crítico. Los experimentos confirman el análisis teórico. Sin embargo, el valor efectivo del número de Reynolds para el que aparece la transición a la turbulencia depende de una gran cantidad de factores (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

- **Incremento de los fenómenos de transporte**

Los fenómenos de transporte de masa, la cantidad de movimiento y energía se ven notablemente amplificados por efecto de la turbulencia. Esto se debe a las fluctuaciones del movimiento turbulento. Si bien estas fluctuaciones tienen lugar a escalas mucho mayores que la escala molecular, producen efectos difusivos semejantes a los moleculares (al menos cualitativamente) de ahí que a esta propiedad se la conozca como difusividad (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

- **Disipación**

Los flujos turbulentos siempre tienden a disiparse, una vez que el flujo se ha constituido en turbulento, la turbulencia del mismo tiende a mantenerse, aunque para ello necesita de un aporte continuo de energía. Esta energía la extrae de la energía cinética del movimiento turbulento y la invierte en aumentar la energía interna, mediante procesos de deformación a los que se ven sometidas las partículas fluidas. La turbulencia necesita de una transferencia continua de energía para reponer estas pérdidas viscosas. Si no existe suministro de energía la turbulencia decae rápidamente (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

- **Tridimensionalidad**

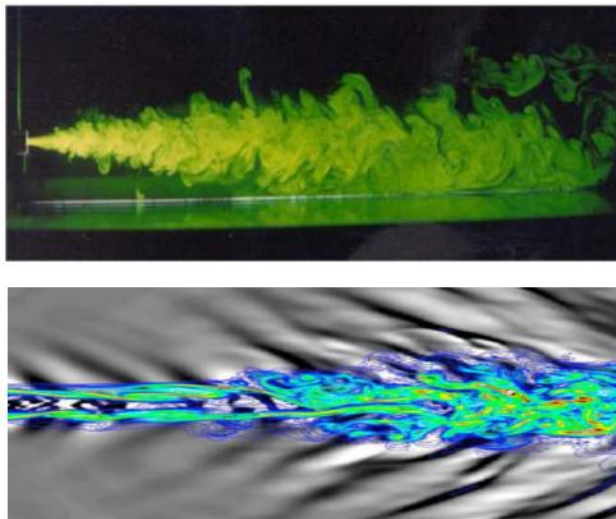
Los movimientos turbulentos son siempre rotacionales y tridimensionales, la turbulencia se caracteriza por los altos niveles de fluctuación de la vorticidad. Las fluctuaciones aleatorias de la vorticidad no pueden mantenerse si las fluctuaciones son bidimensionales, debido a que un mecanismo importante para el mantenimiento de la vorticidad conocido como alargamiento de torbellinos, no puede ocurrir en flujos bidimensionales. Pueden existir flujos turbulentos que al ser promediados en el tiempo resulten ser planos. Incluso pueden existir movimientos turbulentos en los que las escalas más grandes de la turbulencia sean

fundamentalmente bidimensionales, sin embargo a medida que se descende en el tamaño de las escalas dentro del amplio espectro que caracteriza a la turbulencia, se encuentra que el movimiento asociado a estas escalas pequeñas es siempre tridimensional (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

- **Difusividad**

Los fenómenos de transporte de masa, cantidad de movimiento y energía, se ven notablemente amplificados por el efecto de la turbulencia. En realidad la turbulencia conlleva una mezcla continua de las partículas del flujo como se aprecia en la figura 7, por la cual los mecanismos de transporte por difusión se ven reforzados por el transporte convectivo por turbulencia (UNIVERSIDAD DE OVIEDO, 2006).

Figura 7. Detalles de dos chorros turbulentos. (Tomado de: Universidad de Oviedo, 2006).



1.5.2 Origen de la turbulencia

Un fenómeno puede satisfacer todas las leyes de conservación de la naturaleza pero aún así es posible que no suceda. Para que el fenómeno tenga existencia real debe de satisfacer una condición más, que sea estable ante pequeñas perturbaciones. En otras palabras, que las perturbaciones infinitesimales, que inevitablemente están presentes en cualquier sistema real, no se amplifiquen espontáneamente (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

Un flujo laminar es estable ante pequeñas perturbaciones sólo cuando se satisfacen ciertas condiciones. Por ejemplo, en flujos de fluidos viscosos y homogéneos en un conducto, la condición consiste en que el número de Reynolds debe de ser menor que un cierto valor crítico. Cuando esto no se satisface, perturbaciones infinitesimales crecen espontáneamente, en ocasiones estas perturbaciones pueden crecer hasta una amplitud infinita y alcanzar un nuevo estado estable. El nuevo estado puede ser de nuevo inestable frente a otro tipo de perturbaciones y crecer hasta alcanzar un nuevo estado estable. Finalmente el flujo se convierte en una superposición de numerosas perturbaciones aleatorias y alcanza una condición caótica que se conoce como turbulencia (UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010).

1.5.3 Zonas del régimen turbulento

Dentro del régimen turbulento se pueden encontrar tres zonas diferentes: la primera se denomina régimen turbulento liso donde las pérdidas que se producen no dependen de la rugosidad interior del tubo y se presenta para valores del Número de Reynolds bajos por encima de 4000, la segunda es denominada régimen turbulento de transición en la cual las pérdidas dependen de la rugosidad del material del tubo y de las fuerzas de viscosidad, se da para números de Reynolds altos, depende del Número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Y la tercera se denomina régimen turbulento rugoso donde las pérdidas de carga son independientes del número de Reynolds y dependen sólo de la rugosidad del material, se presenta para valores muy elevados del número de Reynolds (SHAMES, 1995).

1.5.4 Flujo turbulento en conductos circulares

El estudio del flujo turbulento desarrollado en una tubería circular es de gran interés por que muchos flujos que se observan en aplicaciones prácticas son de este tipo, en tuberías de grandes diámetros la velocidad media es bastante alta como para que se produzca un flujo turbulento en la mayor parte de las situaciones de ingeniería (POTTER, 1997).

En un flujo turbulento las tres componentes de la velocidad son distintas de cero. Si se miden las componentes en función del tiempo, se obtienen graficas similares a las que se muestran en la (figura 8) para flujo en una tubería donde u , v , y w están en las direcciones x , r y θ , respectivamente. Si se introduce la noción de una

cantidad promediada temporalmente, las componentes de velocidad (u , v , w) se escriben así (POTTER, 1997):

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w'$$

Ecuación 13. Componentes de la velocidad en un flujo turbulento

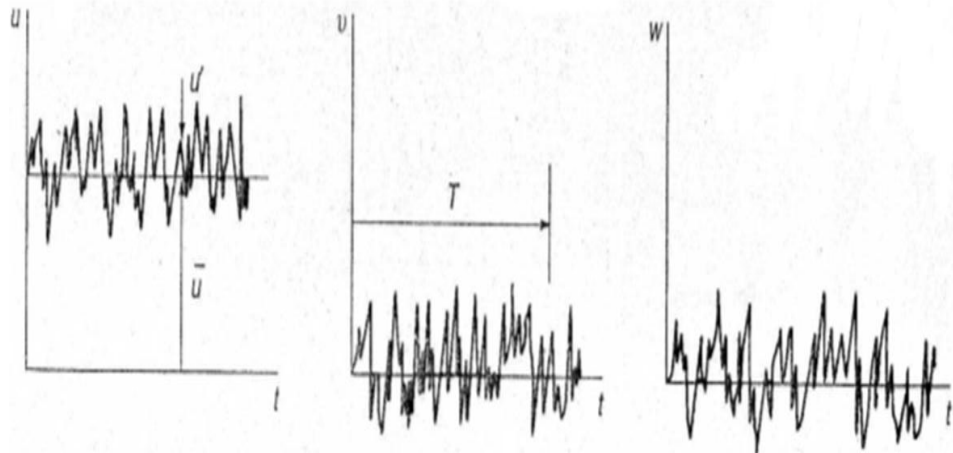
Dónde:

u = Componente x de la velocidad.

v = Componente r de la velocidad.

w = Componente θ de la velocidad.

Figura 8. Componentes de velocidad en un flujo turbulento en una tubería. (Tomado de: Potter, 1997).



Donde una barra sobre una cantidad denota un promedio temporal y un signo de prima denota la parte fluctuante. Utilizando la componente u , el promedio temporal se define como:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

Ecuación 14. Promedio temporal

Donde T es un incremento de tiempo bastante grande como para eliminar toda la dependencia de \bar{u} respecto al tiempo. En un flujo desarrollado en una tubería, \bar{u} sería distinta de cero y $\bar{v} = \bar{w} = 0$, como es evidente en la figura 8 (POTTER, 1997).

1.6 REGÍMENES EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS

A moderados números de Reynolds se produce un cambio profundo y complicado en el comportamiento de los flujos. El movimiento deja de ser suave y ordenado (laminar) y se convierte en fluctuante y agitado (turbulento). Este proceso de cambio se denomina transición hacia la turbulencia (WHITE, 2004).

Si el flujo es laminar puede haber perturbaciones naturales ocasionales que se amortiguan rápidamente. Cuando se inicia la transición aparecen eclosiones de fluctuaciones turbulentas a medida que aumenta el Número de Reynolds, debido a la inestabilidad del movimiento laminar. A números de Reynolds elevados el flujo fluctúa permanentemente y se denomina totalmente turbulento, las fluctuaciones con valores típicos en entre el 1% y el 20% de la velocidad media, no son estrictamente periódicas, sino aleatorias y distribuidas en un rango continuo ó espectro de frecuencias (WHITE, 2004).

El parámetro primario que afecta la transición es el número de Reynolds. Si $Re = UL/\nu$, donde U es la velocidad media, L es la longitud característica transversal de la capa de cortadura y ν la viscosidad cinemática, se pueden encontrar los siguientes comportamientos (WHITE, 2004):

- $0 < Re < 1$: Movimiento laminar (lento) altamente viscoso.
- $1 < Re < 100$: Laminar, fuerte dependencia del Número de Re .
- $100 < Re < 10^3$: Laminar, es útil la teoría de capa límite.
- $10^3 < Re < 10^4$: Transición a la turbulencia.
- $10^4 < Re < 10^6$: Turbulento, moderada dependencia del Número de Re .
- $10^6 < Re < \infty$: Turbulento, débil dependencia del Número de Re .

Estos rangos son indicativos que pueden variar con la geometría del flujo, la rugosidad de la superficie y los niveles de fluctuación de la corriente a la entrada.

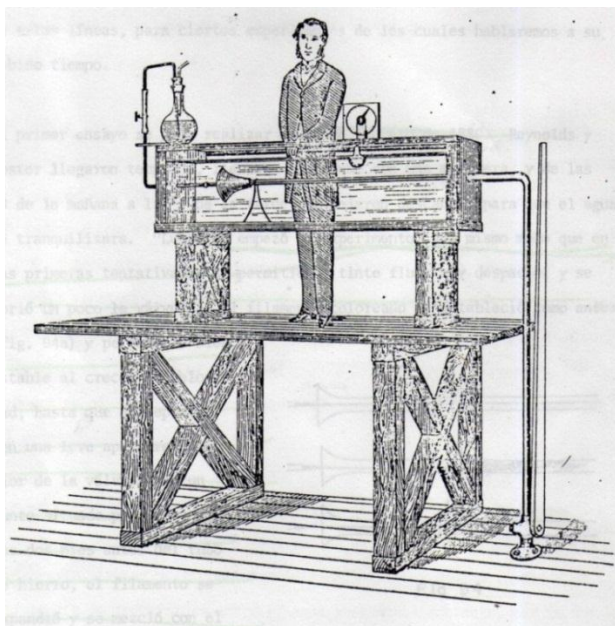
2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 MODELO ORIGINAL DEL EXPERIMENTO DE OSBORNE REYNOLDS

Históricamente se conocían dos tipos de flujo, los cuajes se diferenciaban por su comportamiento en lo concerniente a las pérdidas de energía. En 1840, G. H. L. Hagen había establecido los principios y diferencias de estos dos tipos de flujo. Sin embargo, la correcta descripción y formulación sólo fue planteada entre 1880 y 1884 por Osborne Reynolds, de la Universidad de Cambridge, Inglaterra (SALDARRIAGA, 2001).

Reynolds estudio las características de movimiento de los fluidos, inyectando un trazador dentro de un líquido que fluía por una tubería de vidrio, regulado al final por una válvula. A velocidades bajas del líquido, el trazador se mueve linealmente en la dirección axial, sin embargo a mayores velocidades las líneas del flujo se desorganizan y el trazador se dispersa rápidamente después de su inyección en el líquido, el modelo del equipo se puede observar en la figura 9. El flujo lineal del trazador se denomina laminar y el flujo desordenado obtenido a mayores velocidades del líquido se denomina turbulento (PARDO, 2000).

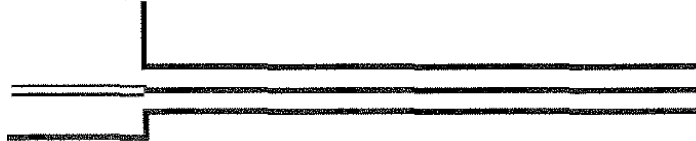
Figura 9. Equipo utilizado por O. Reynolds para establecer el régimen del flujo en tuberías. (Tomado de: LEVI, 1985).



Al abrir la válvula, Reynolds nota que en la tubería se dan varios tipos de flujos, como se presentan en la figura 10.

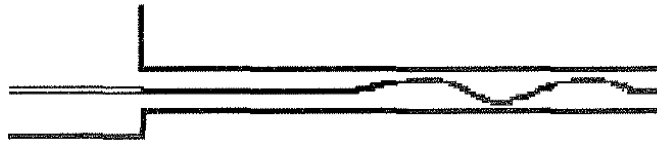
Figura 10. Resultados del experimento de Reynolds. (Tomado de: SALDARRIAGA, 2001).

a) Caudales bajos.



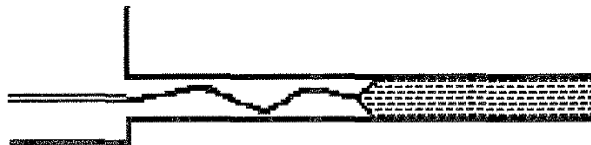
La tinta no se mezcla con el fluido.

b) Caudales intermedios



El filamento de tinta comienza a presentar comportamiento sinusoidal y a hacerse inestable.

c) Caudales altos



El filamento de tinta se mezcla con el fluido.

Al aumentar el caudal (aumento de velocidad) el punto de mezcla se corre aguas arriba. Eventualmente la zona de inestabilidad desaparece. Sin embargo, si sigue aumentando el caudal (Q), el corrimiento del punto de mezcla llega hasta un máximo en donde se detiene; para todo Q hay una zona donde la tinta no se mezcla (SALDARRIAGA, 2001).

2.2 SELECCIÓN DE DISEÑOS

Con base en el diseño original y otros diseños similares desarrollados en el campo de la investigación para el estudio del número de Reynolds y sus parámetros de dependencia, se realizó el diseño del modelo observado en la figura 11,

cumpliendo con las características de visualización y funcionalidad requeridas para el estudio de este parámetro en el laboratorio.

2.3 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Los materiales que hacen parte de la estructura del equipo para el experimento de Reynolds en una tubería horizontal son: láminas de acrílico transparente de 8mm de espesor, una lámina de acrílico blanco de 3mm de espesor, perfiles metálicos de hierro de 1 1/2" x 1/8", tubos de vidrio de 1.6" de diámetro con entradas abocinadas. Tubería y accesorios en PVC tales como: bujes, uniones, adaptadores machos, uniones universales, codos 90°, T 90°, de diferentes diámetros, válvulas de apertura lenta (cortina 3/4"), Válvulas de cierre rápido (bola 1/2"), tubería de vidrio de 10mm, filtro de cartuchos de celulosa, esferas de vidrio de 10mm de diámetro, y una bomba centrífuga de 1/2 hp, 40 l/min.

Figura 11. Equipo para el experimento de Reynolds.



2.4 APLICACIONES DEL EQUIPO

- Confirmación del experimento de Reynolds en un tubo de vidrio horizontal.
- Medición y visualización de las características de los flujos laminar, transición y turbulento.
- Obtención de los distintos números de Reynolds asociados a cada uno de los flujos.

2.5 CALIBRACIÓN

Durante la calibración se realizaron pruebas con carga hidráulica (Δh) constante y diferentes aperturas de válvula aumentando el caudal de descarga, en cada una de ellas se estableció el régimen de flujo a estudiar de acuerdo al fenómeno visualizado al interior de la tubería de vidrio.

Primero se realizó la medición de la temperatura del fluido al interior del tanque de pruebas, con un termómetro de vidrio. Luego se establecieron tres aperturas de válvula por cada régimen de flujo a visualizar (laminar, transición y turbulento), obteniendo distintos valores del caudal de descarga. Para cada apertura se realizaron 11 pruebas, cada una de ellas consistía en aforar con probetas (250ml, 1000ml) el flujo saliente de la tubería de vidrio. Obteniendo registros de volumen y tiempo.

Lo anterior se hizo con el fin de obtener experimentalmente la velocidad del fluido en estudio, y posteriormente determinar el valor del número de Reynolds para cada uno de los caudales de descarga.

Resaltando que a la hora de hacer el registro de los datos se debe tener mucho cuidado en el aforo y posterior lectura de las variables volumen y tiempo, porque un error causa variaciones gigantescas en el cálculo de la velocidad del fluido y posteriormente en el cálculo del número de Reynolds. Principalmente cuando el caudal se sitúa en cercanías a los caudales críticos de visualización de los distintos regímenes de flujo en el equipo, donde el número de Reynolds no coincide con lo visualizado.

2.6 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para elegir el diseño experimental fue necesario seleccionar un orden adecuado para los ensayos experimentales, considerando el tamaño muestral, teniendo presente los objetivos del ensayo.

Se utilizaron tres factores, cada uno de ellos es asociado a un régimen de flujo, para cada factor se seleccionó 3 muestras que corresponden a tres variaciones del caudal de descarga, cada muestra se compone de 11 submuestras. Este proceso se realizó 3 veces partiendo desde la condición inicial.

2.7 MODELO ESTADÍSTICO Y SUS COMPONENTES

El modelo estadístico utilizado consiste en emplear el criterio de Diferencias Mínimas Significativas (DMS) para un análisis de varianza en donde se hace una comparación entre pares de medias a través de la prueba de Tukey.

2.7.1 Prueba de Tukey

(MATE, 1995)

Se emplea para hacer comparaciones múltiples con un número dado de muestras o tratamientos. El método sigue los siguientes pasos:

- Determinar el número de comparaciones múltiples o de diferencias entre r muestras:

$$\text{Nº de comparaciones} = \frac{r(r-1)}{2}$$

- Ordenar los promedios o medias crecientes o decrecientes

- Calcular el valor teórico de la diferencia mínima significativa (DMSt)

$$\text{DMSt} = q_{\alpha} * S\check{X}$$

q_{α} = es un valor tabular (Anexo A) que depende del nivel de significancia α , grados de libertad dentro los grupos GLd y r número de muestras.

$$S\check{X} = \frac{\sqrt{S^2}}{\sqrt{n}}$$

S^2 es la Varianza, n el número de datos de la muestra.

- d. Comparar el valor de DMSt con la diferencia entre medias (D), si (D) es mayor que la diferencia mínima significativa, debe considerarse que la diferencia es significativa ($\alpha = 0.05$) o altamente significativa ($\alpha = 0.01$). En caso contrario se dice es que la diferencia es estadísticamente no significativa.

2.7.2 Diferencias Mínimas Significativas

Se basa en la distribución t de *Student*. Este método no ejerce ningún control sobre la *tasa de error*. Es decir, cada comparación se lleva a cabo utilizando el nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.01$ o $\alpha = 0.05$) por lo que la *tasa de error* para el conjunto de comparaciones llevada a cabo puede ser $1 - (1 - \alpha)^k$, donde α es el nivel de significancia y k el nivel de comparaciones llevadas a cabo. (ARIAS, 1986).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CONSTRUCCIÓN

La construcción del equipo se llevó a cabo siguiendo los objetivos principales planteados al inicio del proyecto. Los materiales utilizados durante la construcción fueron adquiridos con recursos financiados por la Universidad del Valle y en algunos casos, se usaron elementos inutilizados que estaban disponibles en las instalaciones del Laboratorio de Fluidos e Hidráulica, reduciendo considerablemente los costos del proyecto. Otro factor determinante dentro de la construcción de los componentes del equipo fue el apoyo obtenido en cuanto a instalaciones, herramientas y mano de obra necesarias para los trabajos de fabricación, por parte del personal del laboratorio.

El banco experimental para el estudio y visualización del experimento de Osborne Reynolds, se construyó con el fin de brindar una herramienta didáctica y de investigación a los estudiantes de pregrado y posgrado de las diferentes áreas relacionadas con el estudio de la mecánica de fluidos, de gran importancia por su utilización en las aplicaciones de ingeniería.

El resultado final del proyecto en cuanto a las actividades de construcción del equipo y los distintos elementos que lo componen, se ilustra en la figura 12.

Figura 12. Componentes del equipo de Reynolds de tubería horizontal.



3.1.1 Actividades de construcción

La construcción del equipo se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Fluidos e Hidráulica de la Universidad del Valle, donde se desarrollaron actividades tales como; soldadura, pintura, corte de acrílico y perfiles metálicos, etc. Gracias a la existencia en el laboratorio de la herramienta y los instrumentos indispensables para dichas actividades, facilitando así el montaje del equipo.

Figura 13. Cámara experimental y dispositivo de inyección del trazador.



El equipo consta de un tanque en acrílico de 89 cm de largo, 68,4 cm de ancho y 80 cm de profundidad, soportado en su perímetro por una estructura de perfiles metálicos de hierro de 1 1/2" x 1/8".

En una de las paredes se instalaron horizontalmente dos tubos de vidrio de 1.6" de diámetro con entradas abocinadas al interior del tanque, con el objeto de facilitar una circulación del agua de manera regular. Fuera del depósito los tubos

van conectados a tuberías de PVC verticales de desagüe y al final de las tuberías hay válvulas de apertura lenta (cortina) para controlar el caudal de salida.

El tanque se elevó respecto al suelo 90.5 cm, con el fin de alargar el brazo vertical de la tubería de PVC y disminuir los efectos causados por la obstrucción de la válvula. En su interior se colocó una placa de acrílico blanco para disminuir la refracción entre los materiales y el fluido, mejorando notablemente la visualización en la cámara experimental.

En el tramo abocinado a la entrada de la tubería se situó el inyector del trazador, alimentado desde un pequeño depósito exterior a través de una manguera introducida en un tubo de vidrio de 10mm y controlada por un obturador. Como trazador se utilizó un colorante en polvo para uso alimenticio diluido en agua y alcohol, dicha mezcla ayuda a obtener semejanzas entre los pesos específicos del fluido utilizado en el experimento y el trazador (Figura 13).

Para visualizar las características del movimiento ondulatorio del flujo se le permitió al trazador fluir lentamente, abriendo un poco el obturador de la manguera y luego abriendo la válvula de descarga. Así al aumentar el caudal de descarga (es decir, la velocidad de la corriente), se pueden apreciar los distintos regímenes de flujo a través de los tubos de vidrio.

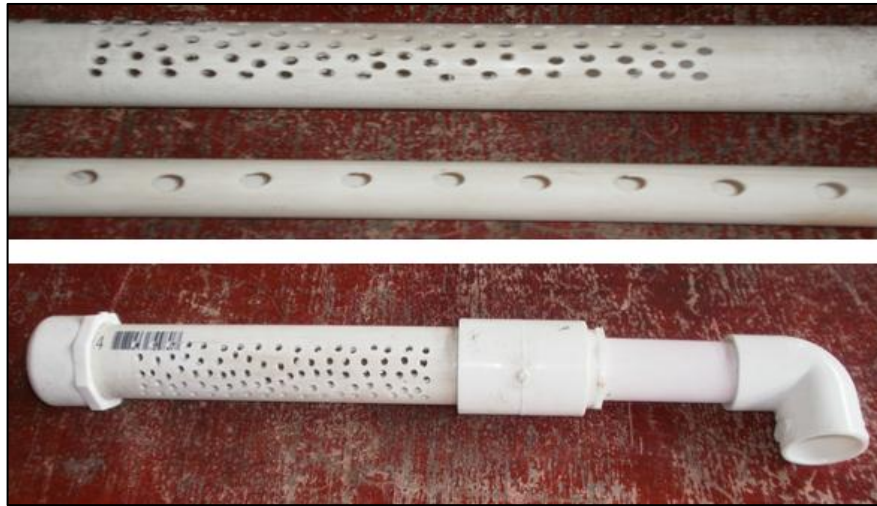
Se instaló un sistema de filtrado y bombeo que hacen parte de un circuito de recirculación de agua, desde un depósito ubicado en la parte inferior del equipo, hasta la cámara de pruebas para mantener la columna de agua constante. El filtro utilizado es de cartuchos de celulosa con el que se impide el paso de sedimentos (figura 14).

Figura 14. Sistema de bombeo y tanque de almacenamiento.



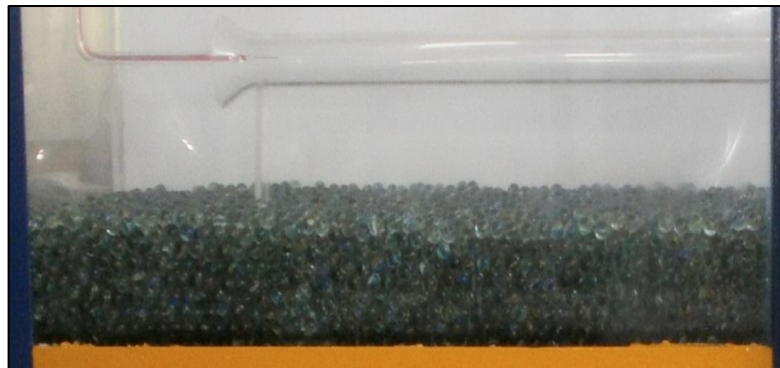
Para controlar la presión de entrada del agua recirculada a la cámara experimental, se utilizó un sistema que disminuye la presión interna, produciendo una pérdida de carga en la conducción (figura 15). Esta pérdida es generada con el fin de que el agua al interior de la cámara experimental permanezca con la menor perturbación o turbulencia posible, este sistema consta de tres tubos de PVC de pulgada y media (1 1/2"), una pulgada (1") y de media pulgada (1/2"), incrustados de mayor a menor diámetro, con líneas de orificios de diferentes diámetros a lo largo de la tubería.

Figura 15. Sistema disipador de energía.



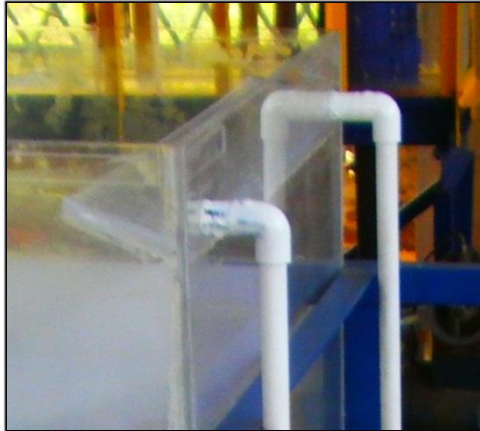
Se utilizó un lecho de esferas de vidrio en el fondo del tanque, cada una de un centímetro de diámetro, para que el agua recirculada ascienda lenta y gradualmente después de pasar por el sistema disipador de energía. Permitiendo una estabilidad en el flujo al interior de la cámara debido a la uniformidad ofrecida por el escenario simétrico que forman las esferas (figura 16).

Figura 16. Lecho de esferas de vidrio.



Para crear un nivel estático de columna de agua dentro del tanque, se ubicó en la parte superior un rebosadero, el cual retorna el agua sobrante hasta el depósito ubicado en la parte inferior del equipo (figura 17).

Figura 17. Rebosadero.



Con el fin de realizar mediciones del caudal que circula por la tubería de vidrio de la cámara experimental, en la salida de la válvula de descarga se colocó una probeta como mecanismo aforador dentro del depósito inferior, que se encuentra ubicado en la base de la estructura metálica. Al cual se le deben suministrar 20 ml de hipoclorito de sodio al 5.32%, luego de iniciada la práctica para neutralizar la disolución del colorante en el agua.

3.1.2 Especificaciones del equipo

- Dimensiones del equipo:
Largo: 1.88 mts, alto: 1.72 mts, ancho: 0.78 mts.
- Cámara experimental:
Largo: 0.89 mts, alto: 0.80 mts, ancho: 0.69 mts.
- Dispositivo móvil para inyección de trazador.
- Válvulas de control de caudal.
- Filtro de agua.
- Suministro de energía 110 v.
- Control de encendido.
- Bomba centrífuga: $\frac{1}{2}$ HP, 40 l/min.
- Tanque de almacenamiento 0.5 m^3 .
- Tanque recolector 0.068 m^3 .
- Peso: 300 kg.
- Fácil desplazamiento.

3.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Se agruparon los datos en 3 factores cada uno asociado a un régimen de flujo sometido a estudio, por cada régimen se agruparon en tres unidades muestrales correspondientes a tres variaciones del caudal. Ejecutando la prueba Tukey se determinó que se requieren 3 comparaciones entre las medias de cada una de las muestras.

En la tabla 1 se presentan los valores de los caudales críticos de visualización de cada uno de los regímenes de flujo en estudio, en el equipo de Reynolds de tubería horizontal.

Tabla 1. Valores de los caudales críticos de visualización obtenidos.

Régimen	Caudal (L/s)	Numero de Reynolds
Laminar	$Q_{\min} = 0,0067$	234,62
	$Q_{\max} = 0,0639$	2290,54
Transición	$Q_{\min} = 0,0645$	2312,05
	$Q_{\max} = 0,1113$	3989,63
Turbulento	$Q_{\min} = 0,1117$	4003,97
	$Q_{\max} = 0,4808$	16835,06

En la tabla 2 se presentan los valores de las diferencias entre las medias obtenidas en los ensayos de calibración y su correspondiente valor teórico de la DMSt con una significancia ($\alpha = 0.05$), para cada uno de los caudales asociados a los regímenes de flujo establecidos.

Comparando la DMSt con cada una de las diferencias entre medias se obtuvo que los resultados del análisis de diferencias mínimas significativas para un 95% de confianza a través de la prueba Tukey, no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras establecidas.

Demostrando que el equipo de Reynolds de tubería horizontal construido permite visualizar los distintos regímenes de flujo, acordes a los valores teóricos establecidos del número de Reynolds para las condiciones del ensayo. Para Re menores a 2300 el flujo es considerado laminar, Re entre 2300 y 4000 se considera en transición y para Re superiores a 4000 el flujo es considerado turbulento (LEVI, 1985).

Aunque Saldarriaga (2001), encontró que cuando el número de Reynolds alcanza un valor de 2200 el flujo pasa de laminar a transición, para valores entre 2200 y 4500 aproximadamente, el flujo se localiza en una zona de transición y para valores mayores pasa a ser turbulento.

Siendo decisivas para la obtención del número de Reynolds de acuerdo al régimen visualizado, las condiciones de perturbación presentes dentro y fuera de la cámara experimental del equipo, al igual que la temperatura del fluido en estudio durante el experimento.

Además se debe ser meticuloso en el momento de hacer el registro de los datos, porque una lectura errónea del tiempo o el volumen causan una variación notable en el cálculo de la velocidad del fluido en la tubería y posteriormente en el cálculo del número de Reynolds.

Tabla 2. Diferencias entre las medias obtenidas para diferentes caudales.

Régimen	Caudal (L/s)	DMSt ($\alpha = 0.05$)	Diferencias entre medias
Laminar	$Q_1 = 0,0117$	13,18	$D_1 = 410,11 - 409,81 = 0,30$
			$D_2 = 410,11 - 408,27 = 1,84$
			$D_3 = 409,81 - 408,27 = 1,54$
	$Q_2 = 0,0249$	13,28	$D_1 = 871,36 - 870,28 = 1,08$
			$D_2 = 871,36 - 870,71 = 0,65$
			$D_3 = 870,71 - 870,28 = 0,43$
	$Q_3 = 0,0442$	9,86	$D_1 = 1549,09 - 1548,48 = 0,62$
			$D_2 = 1549,09 - 1548,90 = 0,19$
			$D_3 = 1548,90 - 1548,48 = 0,42$
Transición	$Q_1 = 0,0700$	38,28	$D_1 = 2453,13 - 2449,90 = 3,23$
			$D_2 = 2453,13 - 2448,29 = 4,84$
			$D_3 = 2449,90 - 2448,29 = 1,61$
	$Q_2 = 0,0817$	29,73	$D_1 = 2864,15 - 2861,70 = 2,46$
			$D_2 = 2864,15 - 2860,44 = 3,71$
			$D_3 = 2861,70 - 2860,44 = 1,26$
	$Q_3 = 0,1007$	14,75	$D_1 = 3526,52 - 3525,01 = 1,51$
			$D_2 = 3526,52 - 3525,14 = 1,38$
			$D_3 = 3525,14 - 3525,01 = 0,13$

Régimen	Caudal (L/s)	DMSt ($\alpha = 0.05$)	Diferencias entre medias
Turbulento	$Q_1 = 0,1209$	55,92	$D_1 = 4238,38 - 4232,91 = 5,47$
			$D_2 = 4238,38 - 4234,05 = 4,33$
			$D_3 = 4234,05 - 4232,91 = 1,14$
	$Q_2 = 0,1459$	66,94	$D_1 = 5116,33 - 5103,59 = 12,74$
			$D_2 = 5116,33 - 5109,04 = 7,29$
			$D_3 = 5109,04 - 5103,59 = 5,45$
	$Q_3 = 0,2196$	134,09	$D_1 = 7693,28 - 7689,23 = 4,05$
			$D_2 = 7693,28 - 7690,26 = 3,02$
			$D_3 = 7690,26 - 7689,23 = 1,03$

Tabla 2. (Continuación).

4. CONCLUSIONES

- Después de realizar los estudios de calibración, se puede afirmar que el equipo construido cumple con las condiciones adecuadas para la demostración del experimento de Reynolds en una sección de tubería horizontal.
- Los resultados del análisis de diferencias mínimas significativas para un 95% de confianza a través de la prueba Tukey, demostraron que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores obtenidos del número de Reynolds, para las distintas variaciones del caudal en el equipo. Concordando los valores obtenidos del número de Reynolds con los valores teóricos establecidos para los distintos regímenes de flujo.
- El equipo desarrollado constituye un instrumento útil para el estudio de la mecánica de fluidos, porque permite visualizar el movimiento ondulatorio del flujo en conductos cerrados, estableciendo para cada régimen el correspondiente número de Reynolds, que es uno de los parámetros más utilizados en la ingeniería, en lo relacionado con los fenómenos de transporte, aeronáutica, meteorología y diseño de reactores, etc.
- Se evidenció un alto nivel de complejidad al calcular el número de Reynolds, porque una alteración mínima de las variables de medición causada por error humano o una perturbación externa en el ambiente que rodea al equipo, cambian indiscutiblemente el número de Reynolds dificultando la visualización de los distintos regímenes de flujo.
- Con el nuevo diseño se puede hacer un uso eficiente del recurso agua utilizado como fluido en estudio, contribuyendo notoriamente al cuidado del medio ambiente con la utilización de tecnologías sanas, empleando un sistema de recirculación en la cámara experimental y un trazador de origen vegetal.

5. RECOMENDACIONES

- Teniendo en cuenta el método utilizado para las mediciones de los caudales, se debe ser meticuloso en el momento de hacer el registro de los datos, porque una lectura errónea del tiempo o el volumen causan una variación notable en el cálculo de la velocidad del fluido en la tubería y posteriormente en el cálculo del número de Reynolds.
- Se deben tener las mínimas condiciones de perturbación en el entorno que rodea al equipo, en el momento de iniciar el ensayo sobre la obtención del número de Reynolds y la visualización de los distintos regímenes de flujo.
- Se debe tratar de igualar la velocidad del trazador y la velocidad del fluido en estudio, para observar mejor el fenómeno de los cambios de flujo.
- La preparación del trazador utilizado en el ensayo se debe hacer con el agua depositada en la cámara experimental, y el mismo día de la realización de la práctica.
- El estudiante o la persona que realice el aforo del caudal de descarga del fluido en estudio, simultáneamente debe manejar el cronómetro y la probeta. De este modo se logra una menor incidencia en el cálculo del número de Reynolds.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIAS, A. 1986. Curso de biometría. Universidad del Valle. Departamento de mecánica de fluidos y ciencias térmicas. Cali. 120 pp.
- CENGEL, Y., CIMBALA, J. 2007. Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones. McGraw-Hill Interamericana. México D. F. 321-337 pp.
- GILES, R. 1995. Mecánica de los fluidos e hidráulica. 3a ed. McGraw-Hill Interamericana. Madrid. 96-98 pp.
- LEVENSPIEL, O. 1993. Flujo de fluidos e intercambio de calor. 2a ed. Reverté, S.A. Barcelona. 22-23 pp.
- LEVI, E. 1985. El agua según la ciencia. Informe del Instituto de Ingeniería. D24. UNAM. México D. F. 64-75 pp.
- MATAIX, C. 1986. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas. 2a ed. Ediciones del Castillo S.A. Madrid. 194-197 pp.
- MATE, C. 1995. Curso general sobre statgraphics: procedimientos, métodos estadísticos. Universidad Pontifica de Comillas. Madrid. 775 pp.
- MESEGUER, A., MELLIBOVSKY, F. El enigma de Osborne Reynolds [en línea]. Investigación y Ciencia. Marzo de 2010, No 402. [citado el 16 de Diciembre de 2011]
http://www.investigacionyciencia.es/busqueda.asp?buscar=1&que_busca=6&cadena=reynolds.
- MOTT, R. 2006. Mecánica de fluidos. 6a ed. Pearson educación. México D. F. 230-232 pp.
- PARDO, L. 2000. Flujo en tuberías. Informe del grupo de hidráulica aplicada. Universidad Tecnológica del Choco. Quibdó. 3-5 pp.
- POTTER, M. 1997. Mecánica de Fluidos. 2a ed. Prentice-Hall Inc. México D. F. 281-282 pp.

- SALDARRIAGA, J. 2001. Hidráulica de tuberías. 1a ed. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá. 2-5 pp.
- SHAMES, I. 1995. Mecánica de Fluidos. 3a ed. McGraw-Hill Interamericana. Santafé de Bogotá. 316-318 pp.
- STREETER, V. 2000. Mecánica de fluidos. 9a ed. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá. 107-109 pp.
- UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Curso de Mecánica de Fluidos. Facultad de Ingeniería. España. [citado el 11 de Octubre de 2011]
http://www.uniovi.es/Areas/Mecanica.Fluidos/docencia/_asignaturas/mecanica_de_fluidos_minas/lp4.pdf.
- UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Curso de Mecánica de Fluidos. Facultad de Ingeniería. España. [citado el 29 de Octubre de 2010]
<https://intranet.uva.es/ficheros/Programas/TURBULENCIA%20Lecc18.pdf>.
- WHITE, F. 2004. Mecánica de Fluidos. 5a ed. McGraw-Hill. Madrid. 224-268 pp.

ANEXOS

ANEXO A. REGISTRO DE DATOS

Factor Laminar (Repetición # 1)					
# Muestra	Caudal	Viscosidad (m2/s)	Diámetro tubería (m)	Velocidad (m/s)	Re
1	Q1 = 0,0117 L/s	9,09E-07	0,04	9,81E-03	431,59
		9,09E-07	0,04	9,67E-03	425,35
		9,09E-07	0,04	9,75E-03	428,95
		9,09E-07	0,04	9,54E-03	419,77
		9,09E-07	0,04	9,41E-03	413,98
		9,09E-07	0,04	9,04E-03	397,85
		9,09E-07	0,04	9,04E-03	397,87
		9,09E-07	0,04	8,87E-03	390,27
		9,09E-07	0,04	8,98E-03	395,22
		9,09E-07	0,04	8,97E-03	394,94
		9,09E-07	0,04	9,44E-03	415,46
	Q2 = 0,0249 L/s	9,09E-07	0,04	1,99E-02	877,47
		9,09E-07	0,04	2,00E-02	880,02
		9,09E-07	0,04	2,02E-02	888,64
		9,09E-07	0,04	1,98E-02	871,48
		9,09E-07	0,04	2,00E-02	878,55
		9,09E-07	0,04	1,97E-02	868,58
		9,09E-07	0,04	1,95E-02	858,92
		9,09E-07	0,04	1,93E-02	851,39
		9,09E-07	0,04	1,96E-02	864,22
		9,09E-07	0,04	1,98E-02	872,63
		9,09E-07	0,04	1,97E-02	865,96
	Q3 = 0,0442 L/s	9,09E-07	0,04	3,53E-02	1553,27
		9,09E-07	0,04	3,55E-02	1564,06
		9,09E-07	0,04	3,54E-02	1556,34
		9,09E-07	0,04	3,51E-02	1544,89
		9,09E-07	0,04	3,51E-02	1544,00
		9,09E-07	0,04	3,51E-02	1542,55
		9,09E-07	0,04	3,49E-02	1536,74
		9,09E-07	0,04	3,48E-02	1533,11
		9,09E-07	0,04	3,50E-02	1541,59
		9,09E-07	0,04	3,55E-02	1561,70
		9,09E-07	0,04	3,53E-02	1554,98

Factor Transición (Repetición # 1)					
# Muestra	Caudal	Viscosidad (m2/s)	Diámetro tubería (m)	Velocidad (m/s)	Re
2	Q1 = 0,0700 L/s	9,09E-07	0,04	5,49E-02	2417,34
		9,09E-07	0,04	5,49E-02	2413,83
		9,09E-07	0,04	5,66E-02	2492,05
		9,09E-07	0,04	5,64E-02	2482,26
		9,09E-07	0,04	5,56E-02	2448,78
		9,09E-07	0,04	5,47E-02	2406,66
		9,09E-07	0,04	5,65E-02	2487,67
		9,09E-07	0,04	5,60E-02	2465,74
		9,09E-07	0,04	5,51E-02	2424,29
		9,09E-07	0,04	5,57E-02	2452,84
		9,09E-07	0,04	5,54E-02	2439,75
	Q2 = 0,0817 L/s	9,09E-07	0,04	6,56E-02	2886,95
		9,09E-07	0,04	6,45E-02	2836,62
		9,09E-07	0,04	6,57E-02	2888,95
		9,09E-07	0,04	6,48E-02	2850,61
		9,09E-07	0,04	6,53E-02	2873,24
		9,09E-07	0,04	6,47E-02	2848,89
		9,09E-07	0,04	6,51E-02	2863,73
		9,09E-07	0,04	6,41E-02	2819,84
		9,09E-07	0,04	6,50E-02	2861,19
		9,09E-07	0,04	6,60E-02	2902,53
		9,09E-07	0,04	6,47E-02	2846,11
	Q3 = 0,1007 L/s	9,09E-07	0,04	7,99E-02	3516,79
		9,09E-07	0,04	8,01E-02	3523,11
		9,09E-07	0,04	8,04E-02	3538,05
		9,09E-07	0,04	7,99E-02	3517,53
		9,09E-07	0,04	7,96E-02	3501,76
		9,09E-07	0,04	8,00E-02	3520,79
		9,09E-07	0,04	8,00E-02	3520,89
		9,09E-07	0,04	8,00E-02	3522,00
		9,09E-07	0,04	8,11E-02	3568,67
		9,09E-07	0,04	8,01E-02	3524,21
		9,09E-07	0,04	8,00E-02	3521,32

Factor Turbulento (Repetición # 1)					
# Muestra	Caudal	Viscosidad (m ² /s)	Diámetro tubería (m)	Velocidad (m/s)	Re
3	Q1 = 0,1209 L/s	9,09E-07	0,04	9,66E-02	4252,14
		9,09E-07	0,04	9,74E-02	4286,31
		9,09E-07	0,04	9,56E-02	4205,82
		9,09E-07	0,04	9,75E-02	4288,67
		9,09E-07	0,04	9,60E-02	4224,95
		9,09E-07	0,04	9,68E-02	4261,40
		9,09E-07	0,04	9,73E-02	4282,27
		9,09E-07	0,04	9,48E-02	4172,31
		9,09E-07	0,04	9,40E-02	4135,06
		9,09E-07	0,04	9,62E-02	4235,11
		9,09E-07	0,04	9,59E-02	4218,03
	Q2 = 0,1459 L/s	9,09E-07	0,04	1,14E-01	5002,51
		9,09E-07	0,04	1,17E-01	5169,26
		9,09E-07	0,04	1,18E-01	5194,92
		9,09E-07	0,04	1,18E-01	5213,29
		9,09E-07	0,04	1,15E-01	5067,59
		9,09E-07	0,04	1,16E-01	5116,46
		9,09E-07	0,04	1,14E-01	5004,20
		9,09E-07	0,04	1,14E-01	5027,28
		9,09E-07	0,04	1,16E-01	5115,95
		9,09E-07	0,04	1,18E-01	5175,39
		9,09E-07	0,04	1,16E-01	5112,57
	Q3 = 0,2196 L/s	9,09E-07	0,04	1,77E-01	7807,42
		9,09E-07	0,04	1,78E-01	7825,16
		9,09E-07	0,04	1,77E-01	7802,83
		9,09E-07	0,04	1,75E-01	7709,75
		9,09E-07	0,04	1,74E-01	7646,91
		9,09E-07	0,04	1,74E-01	7650,24
		9,09E-07	0,04	1,73E-01	7593,10
		9,09E-07	0,04	1,79E-01	7885,26
		9,09E-07	0,04	1,73E-01	7613,20
		9,09E-07	0,04	1,75E-01	7689,05
		9,09E-07	0,04	1,68E-01	7403,17

Factor Laminar (Repetición # 2)					
# Muestra	Caudal	Viscosidad (m2/s)	Diámetro tubería (m)	Velocidad (m/s)	Re
1	Q1 = 0,0117 L/s	9,09E-07	0,04	9,44E-03	415,55
		9,09E-07	0,04	9,34E-03	411,12
		9,09E-07	0,04	9,55E-03	420,21
		9,09E-07	0,04	9,18E-03	403,79
		9,09E-07	0,04	9,39E-03	413,36
		9,09E-07	0,04	9,28E-03	408,46
		9,09E-07	0,04	9,32E-03	410,33
		9,09E-07	0,04	9,39E-03	413,09
		9,09E-07	0,04	9,21E-03	405,31
		9,09E-07	0,04	9,26E-03	407,47
		9,09E-07	0,04	9,07E-03	399,25
	Q2 = 0,0249 L/s	9,09E-07	0,04	1,95E-02	857,83
		9,09E-07	0,04	2,00E-02	880,22
		9,09E-07	0,04	1,98E-02	869,82
		9,09E-07	0,04	2,04E-02	896,04
		9,09E-07	0,04	1,96E-02	862,68
		9,09E-07	0,04	1,95E-02	858,84
		9,09E-07	0,04	1,99E-02	875,44
		9,09E-07	0,04	1,96E-02	862,37
		9,09E-07	0,04	1,99E-02	877,33
		9,09E-07	0,04	1,97E-02	866,25
		9,09E-07	0,04	1,97E-02	866,27
	Q3 = 0,0442 L/s	9,09E-07	0,04	3,54E-02	1558,59
		9,09E-07	0,04	3,54E-02	1556,34
		9,09E-07	0,04	3,55E-02	1561,82
		9,09E-07	0,04	3,53E-02	1553,41
		9,09E-07	0,04	3,51E-02	1544,25
		9,09E-07	0,04	3,51E-02	1545,60
		9,09E-07	0,04	3,50E-02	1540,44
		9,09E-07	0,04	3,50E-02	1542,26
		9,09E-07	0,04	3,55E-02	1562,54
		9,09E-07	0,04	3,49E-02	1534,72
		9,09E-07	0,04	3,50E-02	1540,04

Factor Transición (Repetición # 2)					
# Muestra	Caudal	Viscosidad (m2/s)	Diámetro tubería (m)	Velocidad (m/s)	Re
2	Q1 = 0,0700 L/s	9,09E-07	0,04	5,63E-02	2478,17
		9,09E-07	0,04	5,57E-02	2451,23
		9,09E-07	0,04	5,49E-02	2415,01
		9,09E-07	0,04	5,64E-02	2483,52
		9,09E-07	0,04	5,60E-02	2463,10
		9,09E-07	0,04	5,50E-02	2420,97
		9,09E-07	0,04	5,64E-02	2482,59
		9,09E-07	0,04	5,51E-02	2422,45
		9,09E-07	0,04	5,53E-02	2433,04
		9,09E-07	0,04	5,64E-02	2483,07
		9,09E-07	0,04	5,49E-02	2415,77
	Q2 = 0,0817 L/s	9,09E-07	0,04	6,55E-02	2883,80
		9,09E-07	0,04	6,58E-02	2894,31
		9,09E-07	0,04	6,51E-02	2865,08
		9,09E-07	0,04	6,51E-02	2863,51
		9,09E-07	0,04	6,54E-02	2878,56
		9,09E-07	0,04	6,56E-02	2888,46
		9,09E-07	0,04	6,51E-02	2863,51
		9,09E-07	0,04	6,46E-02	2844,15
		9,09E-07	0,04	6,45E-02	2838,70
		9,09E-07	0,04	6,43E-02	2827,84
		9,09E-07	0,04	6,49E-02	2857,76
	Q3 = 0,1007 L/s	9,09E-07	0,04	8,02E-02	3530,00
		9,09E-07	0,04	8,02E-02	3529,77
		9,09E-07	0,04	8,01E-02	3525,26
		9,09E-07	0,04	8,04E-02	3535,76
		9,09E-07	0,04	7,96E-02	3501,76
		9,09E-07	0,04	8,01E-02	3523,51
		9,09E-07	0,04	8,00E-02	3520,29
		9,09E-07	0,04	8,05E-02	3542,96
		9,09E-07	0,04	8,01E-02	3524,06
		9,09E-07	0,04	8,02E-02	3528,09
		9,09E-07	0,04	8,02E-02	3530,23

Factor Turbulento (Repetición # 2)					
# Muestra	Caudal	Viscosidad (m2/s)	Diámetro tubería (m)	Velocidad (m/s)	Re
3	Q1 = 0,1209 L/s	9,09E-07	0,04	9,75E-02	4288,67
		9,09E-07	0,04	9,75E-02	4291,79
		9,09E-07	0,04	9,69E-02	4264,71
		9,09E-07	0,04	9,73E-02	4282,56
		9,09E-07	0,04	9,77E-02	4297,61
		9,09E-07	0,04	9,59E-02	4220,07
		9,09E-07	0,04	9,37E-02	4121,69
		9,09E-07	0,04	9,51E-02	4183,92
		9,09E-07	0,04	9,40E-02	4138,44
		9,09E-07	0,04	9,73E-02	4281,85
		9,09E-07	0,04	9,66E-02	4250,89
	Q2 = 0,1459 L/s	9,09E-07	0,04	1,16E-01	5104,04
		9,09E-07	0,04	1,15E-01	5078,52
		9,09E-07	0,04	1,18E-01	5201,89
		9,09E-07	0,04	1,15E-01	5062,78
		9,09E-07	0,04	1,15E-01	5060,47
		9,09E-07	0,04	1,16E-01	5089,60
		9,09E-07	0,04	1,15E-01	5061,78
		9,09E-07	0,04	1,15E-01	5075,42
		9,09E-07	0,04	1,16E-01	5105,07
		9,09E-07	0,04	1,17E-01	5144,56
		9,09E-07	0,04	1,17E-01	5155,37
	Q3 = 0,2196 L/s	9,09E-07	0,04	1,78E-01	7844,85
		9,09E-07	0,04	1,74E-01	7674,69
		9,09E-07	0,04	1,78E-01	7830,32
		9,09E-07	0,04	1,74E-01	7644,68
		9,09E-07	0,04	1,75E-01	7699,77
		9,09E-07	0,04	1,75E-01	7680,33
		9,09E-07	0,04	1,72E-01	7590,02
		9,09E-07	0,04	1,73E-01	7604,83
		9,09E-07	0,04	1,75E-01	7707,00
		9,09E-07	0,04	1,69E-01	7448,49
		9,09E-07	0,04	1,79E-01	7856,51

Factor Laminar (Repetición # 3)					
# Muestra	Caudal	Viscosidad (m2/s)	Diámetro tubería (m)	Velocidad (m/s)	Re
1	Q1 = 0,0117 L/s	9,09E-07	0,04	9,52E-03	418,77
		9,09E-07	0,04	9,44E-03	415,61
		9,09E-07	0,04	9,79E-03	430,99
		9,09E-07	0,04	9,31E-03	409,78
		9,09E-07	0,04	9,42E-03	414,46
		9,09E-07	0,04	9,19E-03	404,43
		9,09E-07	0,04	9,21E-03	405,27
		9,09E-07	0,04	9,39E-03	413,35
		9,09E-07	0,04	8,88E-03	390,87
		9,09E-07	0,04	8,95E-03	393,69
		9,09E-07	0,04	8,95E-03	393,76
	Q2 = 0,0249 L/s	9,09E-07	0,04	1,96E-02	860,29
		9,09E-07	0,04	1,96E-02	862,42
		9,09E-07	0,04	1,94E-02	852,84
		9,09E-07	0,04	2,05E-02	902,12
		9,09E-07	0,04	1,96E-02	861,73
		9,09E-07	0,04	1,99E-02	875,44
		9,09E-07	0,04	1,96E-02	864,47
		9,09E-07	0,04	1,99E-02	873,52
		9,09E-07	0,04	2,01E-02	885,90
		9,09E-07	0,04	1,99E-02	873,92
		9,09E-07	0,04	1,98E-02	872,34
	Q3 = 0,0442 L/s	9,09E-07	0,04	3,50E-02	1540,04
		9,09E-07	0,04	3,53E-02	1553,12
		9,09E-07	0,04	3,52E-02	1547,29
		9,09E-07	0,04	3,52E-02	1547,88
		9,09E-07	0,04	3,54E-02	1556,34
		9,09E-07	0,04	3,53E-02	1554,21
		9,09E-07	0,04	3,53E-02	1554,84
		9,09E-07	0,04	3,53E-02	1554,59
		9,09E-07	0,04	3,51E-02	1545,26
		9,09E-07	0,04	3,50E-02	1540,42
		9,09E-07	0,04	3,51E-02	1543,91

Factor Transición (Repetición # 3)					
# Muestra	Caudal	Viscosidad (m2/s)	Diámetro tubería (m)	Velocidad (m/s)	Re
2	Q1 = 0,0700 L/s	9,09E-07	0,04	5,61E-02	2469,66
		9,09E-07	0,04	5,50E-02	2421,43
		9,09E-07	0,04	5,57E-02	2449,51
		9,09E-07	0,04	5,62E-02	2471,83
		9,09E-07	0,04	5,59E-02	2460,21
		9,09E-07	0,04	5,45E-02	2400,27
		9,09E-07	0,04	5,39E-02	2371,56
		9,09E-07	0,04	5,62E-02	2474,58
		9,09E-07	0,04	5,58E-02	2454,50
		9,09E-07	0,04	5,71E-02	2513,53
		9,09E-07	0,04	5,68E-02	2497,38
	Q2 = 0,0817 L/s	9,09E-07	0,04	6,42E-02	2824,00
		9,09E-07	0,04	6,55E-02	2880,76
		9,09E-07	0,04	6,44E-02	2835,78
		9,09E-07	0,04	6,54E-02	2875,84
		9,09E-07	0,04	6,46E-02	2841,43
		9,09E-07	0,04	6,62E-02	2912,97
		9,09E-07	0,04	6,52E-02	2868,46
		9,09E-07	0,04	6,56E-02	2885,34
		9,09E-07	0,04	6,41E-02	2820,34
		9,09E-07	0,04	6,42E-02	2823,60
		9,09E-07	0,04	6,58E-02	2896,31
	Q3 = 0,1007 L/s	9,09E-07	0,04	8,00E-02	3522,48
		9,09E-07	0,04	8,04E-02	3539,82
		9,09E-07	0,04	8,06E-02	3546,37
		9,09E-07	0,04	7,99E-02	3516,41
		9,09E-07	0,04	7,96E-02	3501,76
		9,09E-07	0,04	8,00E-02	3520,29
		9,09E-07	0,04	8,02E-02	3530,46
		9,09E-07	0,04	8,01E-02	3526,95
		9,09E-07	0,04	8,01E-02	3525,10
		9,09E-07	0,04	8,01E-02	3525,58
		9,09E-07	0,04	8,00E-02	3521,32

Factor Turbulento (Repetición # 3)					
# Muestra	Caudal	Viscosidad (m ² /s)	Diámetro tubería (m)	Velocidad (m/s)	Re
3	Q1 = 0,1209 L/s	9,09E-07	0,04	9,70E-02	4266,51
		9,09E-07	0,04	9,71E-02	4271,78
		9,09E-07	0,04	9,64E-02	4240,23
		9,09E-07	0,04	9,61E-02	4227,12
		9,09E-07	0,04	9,70E-02	4267,04
		9,09E-07	0,04	9,52E-02	4187,42
		9,09E-07	0,04	9,55E-02	4202,11
		9,09E-07	0,04	9,72E-02	4275,15
		9,09E-07	0,04	9,55E-02	4202,11
		9,09E-07	0,04	9,63E-02	4237,64
		9,09E-07	0,04	9,54E-02	4197,47
	Q2 = 0,1459 L/s	9,09E-07	0,04	1,15E-01	5080,52
		9,09E-07	0,04	1,14E-01	5024,78
		9,09E-07	0,04	1,17E-01	5141,47
		9,09E-07	0,04	1,17E-01	5149,65
		9,09E-07	0,04	1,16E-01	5106,73
		9,09E-07	0,04	1,15E-01	5071,90
		9,09E-07	0,04	1,15E-01	5062,19
		9,09E-07	0,04	1,17E-01	5157,14
		9,09E-07	0,04	1,18E-01	5187,79
		9,09E-07	0,04	1,18E-01	5192,78
		9,09E-07	0,04	1,16E-01	5104,68
	Q3 = 0,2196 L/s	9,09E-07	0,04	1,76E-01	7755,57
		9,09E-07	0,04	1,73E-01	7620,41
		9,09E-07	0,04	1,72E-01	7564,70
		9,09E-07	0,04	1,77E-01	7805,13
		9,09E-07	0,04	1,74E-01	7660,10
		9,09E-07	0,04	1,73E-01	7617,23
		9,09E-07	0,04	1,76E-01	7728,73
		9,09E-07	0,04	1,78E-01	7813,06
		9,09E-07	0,04	1,72E-01	7590,02
		9,09E-07	0,04	1,73E-01	7602,50
		9,09E-07	0,04	1,78E-01	7835,43

ANEXO B. VALORES DE LAS MEDIAS OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN

FACTOR LAMINAR CAUDAL 1					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
X_A	X_A^2	X_B	X_B^2	X_C	X_C^2
431,59	186269,35	415,55	172680,82	418,77	175365,84
425,35	180926,79	411,12	169018,10	415,61	172734,00
428,95	183994,65	420,21	176577,34	430,99	185748,69
419,77	176206,19	403,79	163050,00	409,78	167919,89
413,98	171381,38	413,36	170867,39	414,46	171776,59
397,85	158283,99	408,46	166841,25	404,43	163562,41
397,87	158296,73	410,33	168367,38	405,27	164241,22
390,27	152308,29	413,09	170645,96	413,35	170856,52
395,22	156201,05	405,31	164278,69	390,87	152778,67
394,94	155973,83	407,47	166030,51	393,69	154990,93
415,46	172609,44	399,25	159400,90	393,76	155044,37
$\Sigma = 4511,24$	$\Sigma = 1852451,69$	$\Sigma = 4507,95$	$\Sigma = 1847758,34$	$\Sigma = 4490,96$	$\Sigma = 1835019,11$
$\bar{X}_A = 410,11$		$\bar{X}_B = 409,81$		$\bar{X}_C = 408,27$	

FACTOR LAMINAR CAUDAL 2					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
X_A	X_A^2	X_B	X_B^2	X_C	X_C^2
877,47	769955,20	857,83	735880,73	860,29	740105,28
880,02	774440,81	880,22	774793,51	862,42	743762,50
888,64	789676,28	869,82	756579,74	852,84	727338,45
871,48	759474,72	896,04	802884,66	902,12	813811,80
878,55	771846,24	862,68	744225,37	861,73	742579,25
868,58	754435,56	858,84	737603,52	875,44	766394,72
858,92	737747,00	875,44	766394,72	864,47	747307,18
851,39	724863,55	862,37	743688,00	873,52	763044,37
864,22	746869,54	877,33	769708,86	885,90	784824,40
872,63	761484,57	866,25	750392,89	873,92	763740,54
865,96	749884,01	866,27	750428,60	872,34	760975,33
$\Sigma = 9577,86$	$\Sigma = 8340677,48$	$\Sigma = 9573,10$	$\Sigma = 8332580,60$	$\Sigma = 9585,00$	$\Sigma = 8353883,82$
$\bar{X}_A = 870,71$		$\bar{X}_B = 870,28$		$\bar{X}_C = 871,36$	

FACTOR LAMINAR CAUDAL 3					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
X_A	X_A^2	X_B	X_B^2	X_C	X_C^2
1553,27	2412659,01	1558,59	2429191,39	1540,04	2371724,97
1564,06	2446286,99	1556,34	2422185,79	1553,12	2412187,10
1556,34	2422185,79	1561,82	2439273,47	1547,29	2394102,71
1544,89	2386696,37	1553,41	2413088,39	1547,88	2395929,23
1544,00	2383945,93	1544,25	2384720,22	1556,34	2422185,79
1542,55	2379451,15	1545,60	2388891,54	1554,21	2415554,21
1536,74	2361579,43	1540,44	2372946,83	1554,84	2417512,01
1533,11	2350421,32	1542,26	2378578,36	1554,59	2416757,92
1541,59	2376501,77	1562,54	2441524,52	1545,26	2387828,98
1561,70	2438919,32	1534,72	2355370,09	1540,42	2372880,50
1554,98	2417953,05	1540,04	2371724,97	1543,91	2383647,25
$\Sigma = 17033,24$	$\Sigma = 26376600,13$	$\Sigma = 17040,01$	$\Sigma = 26397495,55$	$\Sigma = 17037,88$	$\Sigma = 26390310,67$
$\dot{X}_A = 1548,48$		$\dot{X}_B = 1549,09$		$\dot{X}_C = 1548,90$	

FACTOR TRANSICIÓN CAUDAL 1					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
X_A	X_A^2	X_B	X_B^2	X_C	X_C^2
2417,34	5843548,42	2478,17	6141315,91	2469,66	6099228,21
2413,83	5826593,72	2451,23	6008534,62	2421,43	5863318,61
2492,05	6210309,69	2415,01	5832254,73	2449,51	6000080,83
2482,26	6161612,18	2483,52	6167856,53	2471,83	6109942,70
2448,78	5996535,56	2463,10	6066869,57	2460,21	6052633,81
2406,66	5792028,75	2420,97	5861091,54	2400,27	5761280,14
2487,67	6188526,37	2482,59	6163254,51	2371,56	5624304,42
2465,74	6079851,92	2422,45	5868262,39	2474,58	6123527,90
2424,29	5877204,50	2433,04	5919685,06	2454,50	6024589,49
2452,84	6016448,40	2483,07	6165613,87	2513,53	6317845,52
2439,75	5952380,40	2415,77	5835946,61	2497,38	6236899,16
$\Sigma = 26931,23$	$\Sigma = 65945039,91$	$\Sigma = 26948,91$	$\Sigma = 66030685,34$	$\Sigma = 26984,46$	$\Sigma = 66213650,78$
$\dot{X}_A = 2448,29$		$\dot{X}_B = 2449,90$		$\dot{X}_C = 2453,13$	

FACTOR TRANSICIÓN CAUDAL 2					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
X_A	X_A^2	X_B	X_B^2	X_C	X_C^2
2886,95	8334458,87	2883,80	8316310,90	2824,00	7974971,10
2836,62	8046415,05	2894,31	8377035,86	2880,76	8298762,86
2888,95	8346038,53	2865,08	8208657,52	2835,78	8041649,53
2850,61	8125951,18	2863,51	8199674,04	2875,84	8270459,51
2873,24	8255497,13	2878,56	8286133,81	2841,43	8073708,77
2848,89	8116166,35	2888,46	8343181,03	2912,97	8485380,24
2863,73	8200929,91	2863,51	8199674,04	2868,46	8228074,80
2819,84	7951483,24	2844,15	8089198,40	2885,34	8325212,49
2861,19	8186426,91	2838,70	8058240,28	2820,34	7954292,70
2902,53	8424665,60	2827,84	7996653,66	2823,60	7972724,79
2846,11	8100344,66	2857,76	8166776,69	2896,31	8388638,40
$\Sigma = 31478,65$	$\Sigma = 90088377,43$	$\Sigma = 31505,67$	$\Sigma = 90241536,24$	$\Sigma = 31464,83$	$\Sigma = 90013875,19$
$\bar{X}_A = 2861,70$		$\bar{X}_B = 2864,15$		$\bar{X}_C = 2860,44$	

FACTOR TRANSICIÓN CAUDAL 3					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
X_A	X_A^2	X_B	X_B^2	X_C	X_C^2
3516,79	12367797,36	3530,00	12460892,34	3522,48	12407861,06
3523,11	12412311,91	3529,77	12459297,40	3539,82	12530336,40
3538,05	12517773,61	3525,26	12427462,73	3546,37	12576721,15
3517,53	12373035,68	3535,76	12501574,62	3516,41	12365143,75
3501,76	12262315,56	3501,76	12262315,56	3501,76	12262315,56
3520,79	12395963,79	3523,51	12415115,53	3520,29	12392418,79
3520,89	12396696,10	3520,29	12392418,79	3530,46	12464160,99
3522,00	12404486,15	3542,96	12552537,84	3526,95	12439386,42
3568,67	12735416,38	3524,06	12419020,88	3525,10	12426358,09
3524,21	12420028,61	3528,09	12447404,50	3525,58	12429717,25
3521,32	12399707,38	3530,23	12462513,32	3521,32	12399707,38
$\Sigma = 38775,12$	$\Sigma = 136685532,53$	$\Sigma = 38791,68$	$\Sigma = 136800553,52$	$\Sigma = 38776,54$	$\Sigma = 136694126,85$
$\bar{X}_A = 3525,01$		$\bar{X}_B = 3526,52$		$\bar{X}_C = 3525,14$	

FACTOR TURBULENTO CAUDAL 1					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
X_A	X_A^2	X_B	X_B^2	X_C	X_C^2
4252,14	18080659,17	4288,67	18392699,30	4266,51	18203115,03
4286,31	18372419,17	4291,79	18419460,55	4271,78	18248097,63
4205,82	17688890,53	4264,71	18187768,32	4240,23	17979508,83
4288,67	18392699,30	4282,56	18340290,36	4227,12	17868571,16
4224,95	17850187,86	4297,61	18469479,43	4267,04	18207664,38
4261,40	18159527,82	4220,07	17808977,70	4187,42	17534469,62
4282,27	18337848,82	4121,69	16988308,15	4202,11	17657734,41
4172,31	17408158,26	4183,92	17505184,50	4275,15	18276937,73
4135,06	17098686,06	4138,44	17126705,21	4202,11	17657734,41
4235,11	17936170,08	4281,85	18334271,40	4237,64	17957557,17
4218,03	17791758,48	4250,89	18070077,95	4197,47	17618776,37
$\Sigma = 46562,05$	$\Sigma = 197117005,54$	$\Sigma = 46622,21$	$\Sigma = 197643222,87$	$\Sigma = 46574,58$	$\Sigma = 197210166,74$
$\bar{X}_A = 4232,91$		$\bar{X}_B = 4238,38$		$\bar{X}_C = 4234,05$	

FACTOR TURBULENTO CAUDAL 2					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
X_A	X_A^2	X_B	X_B^2	X_C	X_C^2
5002,51	25025133,80	5104,04	26051221,87	5080,52	25811663,47
5169,26	26721281,76	5078,52	25791342,81	5024,78	25248456,35
5194,92	26987163,52	5201,89	27059641,43	5141,47	26434728,53
5213,29	27178421,61	5062,78	25631781,69	5149,65	26518848,53
5067,59	25680428,73	5060,47	25608343,35	5106,73	26078709,31
5116,46	26178151,39	5089,60	25904038,61	5071,90	25724194,38
5004,20	25042045,53	5061,78	25621659,56	5062,19	25625786,30
5027,28	25273520,70	5075,42	25759927,41	5157,14	26596050,38
5115,95	26172971,30	5105,07	26061739,27	5187,79	26913175,44
5175,39	26784699,99	5144,56	26466491,49	5192,78	26964956,43
5112,57	26138351,85	5155,37	26577812,05	5104,68	26057724,63
$\Sigma = 56199,43$	$\Sigma = 287182170,17$	$\Sigma = 56139,50$	$\Sigma = 286533999,54$	$\Sigma = 56279,63$	$\Sigma = 287974293,76$
$\bar{X}_A = 5109,04$		$\bar{X}_B = 5103,59$		$\bar{X}_C = 5116,33$	

FACTOR TURBULENTO CAUDAL 3					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
X_A	X_A^2	X_B	X_B^2	X_C	X_C^2
7807,42	60955863,16	7844,85	61541664,26	7755,57	60148919,63
7825,16	61233122,87	7674,69	58900840,63	7620,41	58070618,41
7802,83	60884193,23	7830,32	61313943,22	7564,70	57224643,16
7709,75	59440321,26	7644,68	58441208,36	7805,13	60919981,14
7646,91	58475283,21	7699,77	59286519,78	7660,10	58677095,95
7650,24	58526158,14	7680,33	58987444,27	7617,23	58022165,07
7593,10	57655163,17	7590,02	57608393,62	7728,73	59733332,23
7885,26	62177257,55	7604,83	57833439,12	7813,06	61043973,22
7613,20	57960800,37	7707,00	59397790,47	7590,02	57608393,62
7689,05	59121449,50	7448,49	55480044,08	7602,50	57798050,75
7403,18	54807001,80	7856,51	61724755,76	7835,43	61393922,95
$\Sigma = 84626,10$	$\Sigma = 651236614,26$	$\Sigma = 84581,50$	$\Sigma = 650516043,58$	$\Sigma = 84592,88$	$\Sigma = 650641096,12$
$\dot{X}_A = 7693,28$		$\dot{X}_B = 7689,23$		$\dot{X}_C = 7690,26$	

ANEXO C. VALOR TABULAR (q_α) PARA LA PRUEBA DE TUKEY

		Valores de q _α para la prueba de Tukey																		
Grupos	número de promedios de los tratamientos																			
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
5	0.05	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	7.17	7.32	7.47	7.60	7.72	7.83	7.93	8.03	8.12	8.21
5	0.01	5.70	6.97	7.80	8.42	8.91	9.32	9.67	9.97	10.24	10.48	10.70	10.89	11.08	11.24	11.40	11.55	11.68	11.81	11.93
6	0.05	3.46	4.34	4.90	5.31	5.63	5.89	6.12	6.32	6.49	6.65	6.79	6.92	7.03	7.14	7.24	7.34	7.43	7.51	7.59
6	0.01	5.24	6.33	7.03	7.56	7.97	8.32	8.61	8.87	9.10	9.30	9.49	9.65	9.81	9.95	10.08	10.21	10.32	10.43	10.54
7	0.05	3.34	4.16	4.68	5.06	5.36	5.61	5.82	6.00	6.16	6.30	6.43	6.55	6.66	6.76	6.85	6.94	7.02	7.09	7.17
7	0.01	4.95	5.92	6.54	7.01	7.37	7.68	7.94	8.17	8.37	8.55	8.71	8.86	9.00	9.12	9.24	9.35	9.46	9.55	9.65
8	0.05	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05	6.18	6.29	6.39	6.48	6.57	6.65	6.73	6.80	6.87
8	0.01	4.74	5.63	6.20	6.63	6.96	7.24	7.47	7.68	7.87	8.03	8.18	8.31	8.44	8.55	8.66	8.76	8.85	8.94	9.03
9	0.05	3.20	3.95	4.42	4.76	5.02	5.24	5.43	5.60	5.74	5.87	5.98	6.09	6.19	6.28	6.36	6.44	6.51	6.58	6.64
9	0.01	4.60	5.43	5.96	6.35	6.66	6.91	7.13	7.32	7.49	7.65	7.78	7.91	8.03	8.13	8.23	8.32	8.41	8.49	8.57
10	0.05	3.15	3.88	4.33	4.65	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	5.72	5.83	5.93	6.03	6.11	6.20	6.27	6.34	6.40	6.47
10	0.01	4.48	5.27	5.77	6.14	6.43	6.67	6.87	7.05	7.21	7.36	7.48	7.60	7.71	7.81	7.91	7.99	8.07	8.15	8.22
11	0.05	3.11	3.82	4.26	4.57	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61	5.71	5.81	5.90	5.99	6.06	6.14	6.20	6.26	6.33
11	0.01	4.39	5.14	5.62	5.97	6.25	6.48	6.67	6.84	6.99	7.13	7.25	7.36	7.46	7.56	7.65	7.73	7.81	7.88	7.95
12	0.05	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.40	5.51	5.62	5.71	5.80	5.88	5.95	6.03	6.09	6.15	6.21
12	0.01	4.32	5.04	5.50	5.84	6.10	6.32	6.51	6.67	6.81	6.94	7.06	7.17	7.26	7.36	7.44	7.52	7.59	7.66	7.73
13	0.05	3.06	3.73	4.15	4.45	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43	5.53	5.63	5.71	5.79	5.86	5.93	6.00	6.05	6.11
13	0.01	4.26	4.96	5.40	5.73	5.98	6.19	6.37	6.53	6.67	6.79	6.90	7.01	7.10	7.19	7.27	7.34	7.42	7.48	7.55
14	0.05	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36	5.46	5.55	5.64	5.72	5.79	5.85	5.92	5.97	6.03
14	0.01	4.21	4.89	5.32	5.63	5.88	6.08	6.26	6.41	6.54	6.66	6.77	6.87	6.96	7.05	7.12	7.20	7.27	7.33	7.39
15	0.05	3.01	3.67	4.08	4.37	4.60	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31	5.40	5.49	5.58	5.65	5.72	5.79	5.85	5.92	5.97
15	0.01	4.17	4.83	5.25	5.56	5.80	5.99	6.16	6.31	6.44	6.55	6.66	6.76	6.84	6.93	7.00	7.07	7.14	7.20	7.26
16	0.05	3.00	3.65	4.05	4.33	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26	5.35	5.44	5.52	5.59	5.66	5.72	5.79	5.84	5.90
16	0.01	4.13	4.78	5.19	5.49	5.72	5.92	6.08	6.22	6.35	6.46	6.56	6.66	6.74	6.82	6.90	6.97	7.03	7.09	7.15
17	0.05	2.98	3.63	4.02	4.30	4.52	4.71	4.86	4.99	5.11	5.21	5.31	5.39	5.47	5.55	5.61	5.68	5.74	5.79	5.84
17	0.01	4.10	4.74	5.14	5.43	5.66	5.85	6.01	6.15	6.27	6.38	6.48	6.57	6.66	6.73	6.80	6.87	6.94	7.00	7.05
18	0.05	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.82	4.96	5.07	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50	5.57	5.63	5.69	5.74	5.79
18	0.01	4.07	4.70	5.09	5.38	5.60	5.79	5.94	6.08	6.20	6.31	6.41	6.50	6.58	6.65	6.72	6.79	6.85	6.91	6.96
19	0.05	2.96	3.59	3.98	4.25	4.47	4.65	4.79	4.92	5.04	5.14	5.23	5.32	5.39	5.46	5.53	5.59	5.65	5.70	5.75
19	0.01	4.05	4.67	5.05	5.33	5.55	5.73	5.89	6.02	6.14	6.25	6.34	6.43	6.51	6.58	6.65	6.72	6.78	6.84	6.89
20	0.05	2.95	3.58	3.96	4.23	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11	5.20	5.28	5.36	5.43	5.49	5.55	5.61	5.66	5.71
20	0.01	4.02	4.64	5.02	5.29	5.51	5.69	5.84	5.97	6.09	6.19	6.29	6.37	6.45	6.52	6.59	6.65	6.71	6.76	6.82
24	0.05	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01	5.10	5.18	5.25	5.32	5.38	5.44	5.50	5.54	5.59
24	0.01	3.96	4.54	4.91	5.17	5.37	5.54	5.69	5.81	5.92	6.02	6.11	6.19	6.26	6.33	6.39	6.45	6.51	6.56	6.61
30	0.05	2.89	3.49	3.84	4.10	4.30	4.46	4.60	4.72	4.83	4.92	5.00	5.08	5.15	5.21	5.27	5.33	5.38	5.43	5.48
30	0.01	3.89	4.45	4.80	5.05	5.24	5.40	5.54	5.65	5.76	5.85	5.93	6.01	6.08	6.14	6.20	6.26	6.31	6.36	6.41
40	0.05	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.74	4.82	4.91	4.98	5.05	5.11	5.16	5.22	5.27	5.31	5.36
40	0.01	3.82	4.37	4.70	4.93	5.11	5.27	5.39	5.50	5.60	5.69	5.77	5.84	5.90	5.96	6.02	6.07	6.12	6.17	6.21
60	0.05	2.83	3.40	3.74	3.98	4.16	4.31	4.44	4.55	4.65	4.73	4.81	4.88	4.94	5.00	5.06	5.11	5.16	5.20	5.24
60	0.01	3.76	4.28	4.60	4.82	4.99	5.13	5.25	5.36	5.45	5.53	5.60	5.67	5.73	5.79	5.84	5.89	5.93	5.98	6.02
120	0.05	2.80	3.36	3.69	3.92	4.10	4.24	4.36	4.48	4.56	4.64	4.72	4.78	4.84	4.90	4.95	5.00	5.05	5.09	5.13
120	0.01	3.70	4.20	4.50	4.71	4.87	5.01	5.12	5.21	5.30	5.38	5.44	5.51	5.56	5.61	5.66	5.71	5.75	5.79	5.83
∞	0.05	2.77	3.31	3.63	3.86	4.03	4.17	4.29	4.39	4.47	4.55	4.62	4.68	4.74	4.80	4.85	4.89	4.93	4.97	5.01
∞	0.01	3.64	4.12	4.43	4.60	4.76	4.88	4.99	5.08	5.16	5.23	5.29	5.35	5.40	5.45	5.49	5.54	5.57	5.61	5.65

Fuente: ARIAS, A. 1986. Curso de biometría. Universidad del Valle. Departamento de mecánica de fluidos y ciencias térmicas. Cali.

ANEXO D. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DEL AGUA (ν) A DIFERENTES TEMPERATURAS (T)

T (°C)	ν (m²/s)	T (°C)	ν (m²/s)
4	$1.568 \cdot 10^{-6}$	30	$0.803 \cdot 10^{-6}$
5	$1.519 \cdot 10^{-6}$	40	$0.659 \cdot 10^{-6}$
10	$1.310 \cdot 10^{-6}$	50	$0.556 \cdot 10^{-6}$
15	$1.146 \cdot 10^{-6}$	60	$0.478 \cdot 10^{-6}$
20	$1.011 \cdot 10^{-6}$	70	$0.416 \cdot 10^{-6}$

Fuente: UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Curso de Mecánica de Fluidos. Facultad de Ingeniería. España. [Citado el 11 de Octubre de 2011].

ANEXO E. PROPIEDADES FÍSICAS DEL HIPOCLORITO DE SODIO

PROPIEDAD	VALOR
Peso Molecular (g/mol)	74,4
Estado Físico	Líquido
Punto de Ebullición (°C) (760 mmHg)	120 (Concentración cloro activo: 6.5%) 40 (5% de NaOCl en agua)
Punto de Fusión (°C)	8,6 (Concentración cloro activo: 6.5%) -6 (5% de NaOCl en agua)
Presión de Vapor (mmHg)	17,5 a 20°C (5% de NaOCl en agua)
Gravedad Específica (Agua = 1)	1,11 - 1,2 a 25°C, agua 4°C (Concentración cloro activo: 6.5%) 1,07 - 1,14 (5% de NaOCl en agua)
Densidad del Vapor (Aire = 1)	No Reportado
Velocidad de Evaporación (Acetato de Butilo = 1)	No Reportado
Solubilidad en Agua	Soluble en agua fría, se descompone en agua caliente (Concentración cloro activo: 6,5%) 100% en agua (5% de NaOCl en agua)
Límites de Inflamabilidad (% vol)	No combustible
Temperatura de Auto ignición (°C)	No reportado
Punto de Inflamación (°C)	No reportado
pH	12 (Concentración cloro activo: 6,5%) 9-10 (5% de NaOCl en agua)

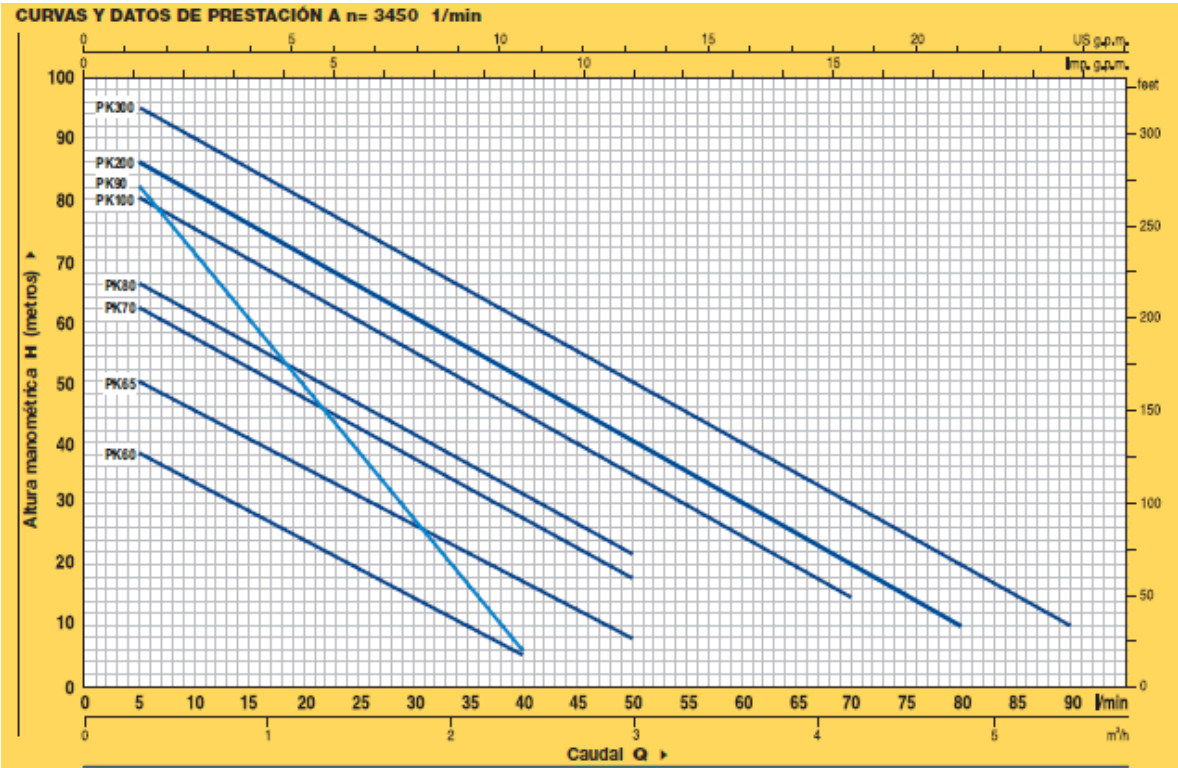
Fuente: Universidad Autónoma de México. Facultad de Química. México [en línea]. [citado el 20 de Enero de 2012].

ANEXO F. USOS, GENERACIÓN Y CONTROL DEL HIPOCLORITO DE SODIO

Uso / Generación	Control
Blanqueado de fibras de celulosa y otros materiales en las industrias de pulpa, de papel y textil.	Aislamiento del proceso; ventilación local; equipo de protección personal.
Dilución para dosificación en la desinfección de piscinas y en el tratamiento de aguas.	Aislamiento del proceso; ventilación local; equipo de protección personal.
Cloración de agua potable.	Aislamiento del proceso; ventilación local; equipo de protección personal.
Eliminación de algas y lama en piscinas, hervidores de agua (especialmente en la industria de pulpa) y recipientes de almacenamiento de agua.	Aislamiento del proceso; ventilación local; equipo de protección personal.
Proceso de eliminación de pelo en la industria del cuero.	Aislamiento del proceso; ventilación local; equipo de protección personal.

Fuente: Universidad Autónoma de México. Facultad de Química. México [en línea]. [Citado el 20 de Enero de 2012].

ANEXO G. CURVAS Y DATOS DE PRESTACIÓN DE LA BOMBA



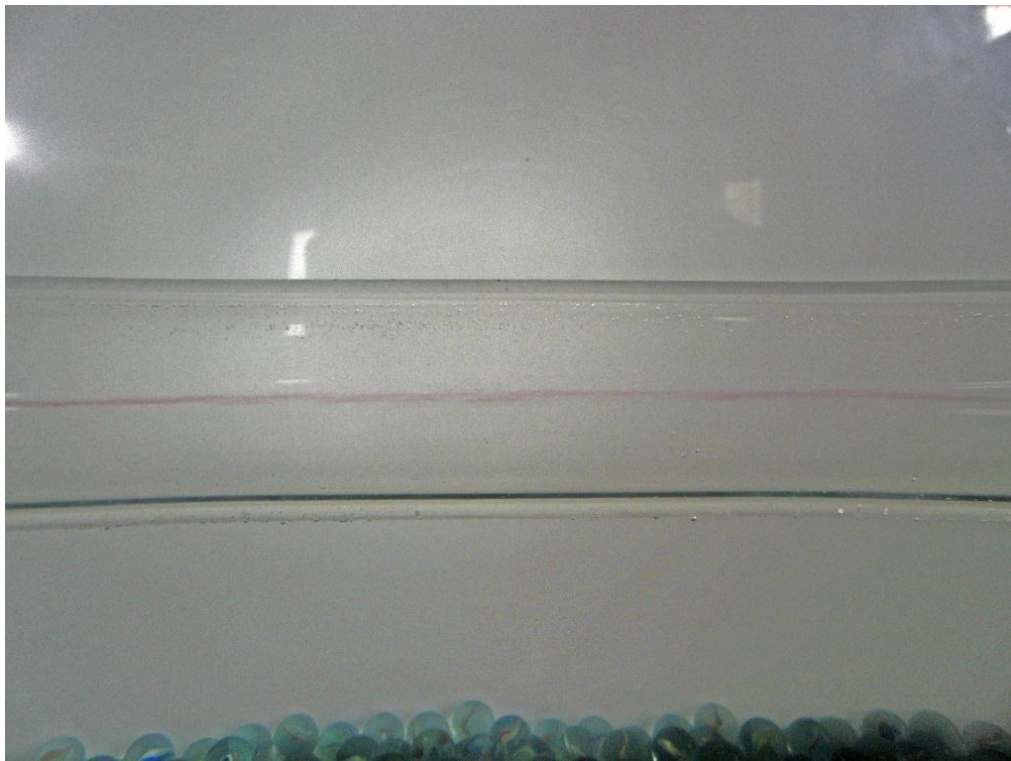
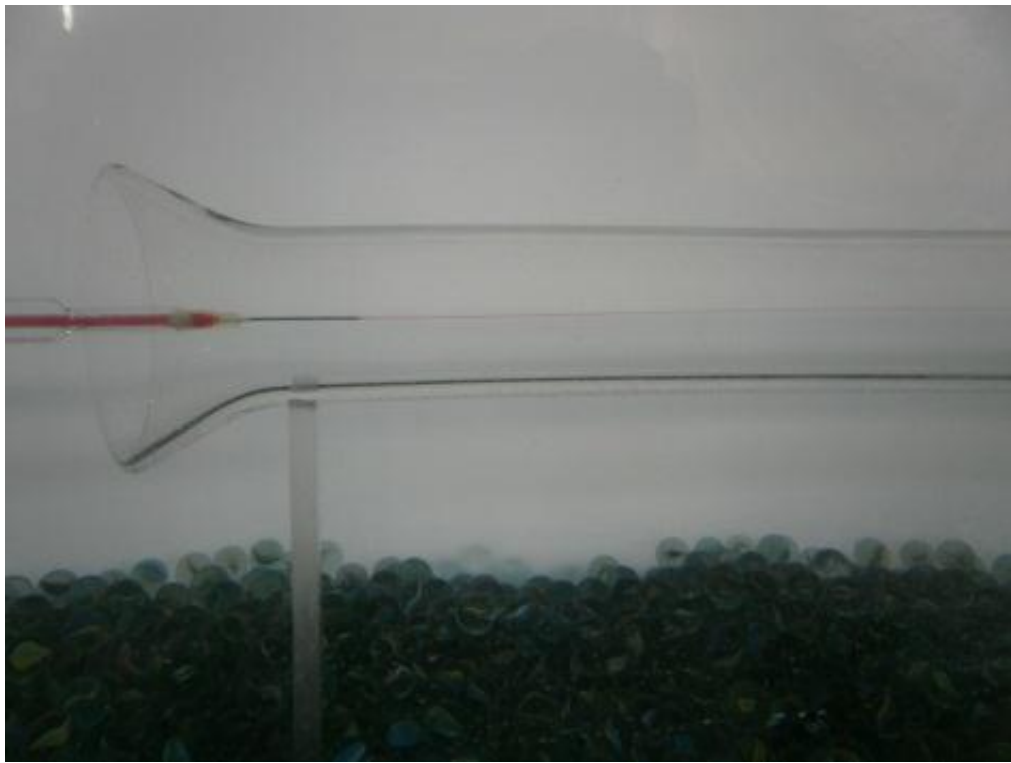
TIPO		POTENCIA		Q ^{m³} l/min	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4
Monofásica	Trifásica	kW	HP		0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
PKm 60*	PK 60*	0.37	0.50	H m	40	38	33.5	29	24	19.5	15	10	5					
PKm 65	PK 65	0.50	0.70		55	50	45.5	40.5	36	31	27	22	17	8				
PKm 70	PK 70	0.60	0.85		65	62	57	52	47	42	37	32	27	18				
PKm 80	PK 80	0.75	1		70	66	61	56	51	46	41	36.5	31	22				
PKm 90	PK 90	0.75	1		90	82	71	60	49	38	27	17	5					
PKm 100	PK 100	1.1	1.5		85	80	75	70	65	60	55	50	45	35	25	15		
PKm 200	PK 200	1.5	2		90	86	81	76	71	65.5	60	55	50	40	30	20	10	
—	PK 300	2.2	3		100	95	90	85	80	75	70	65	60	50	40	30	20	10

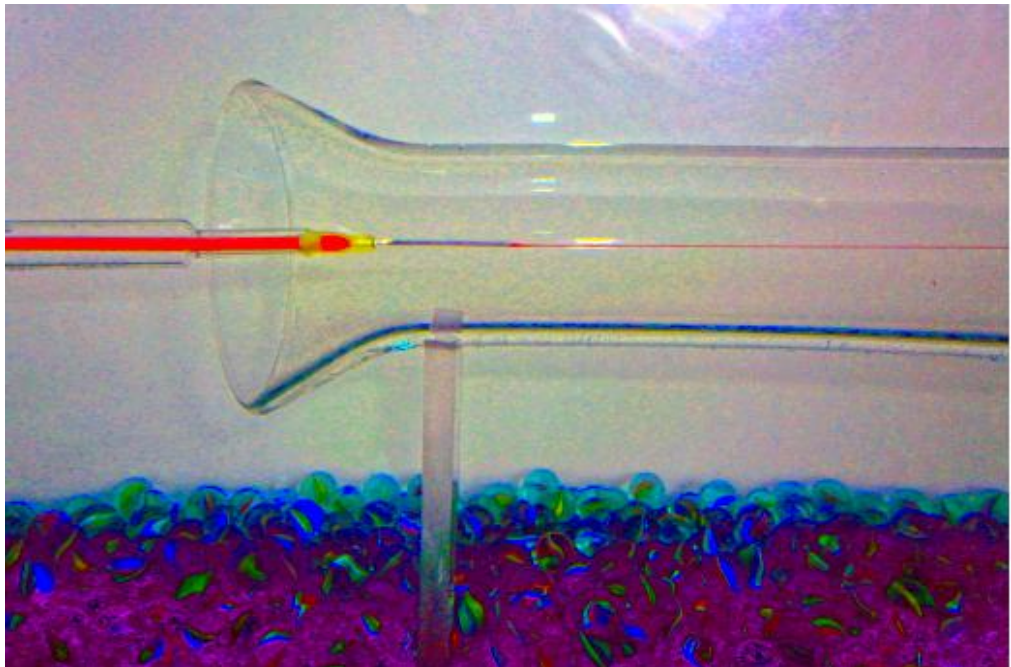
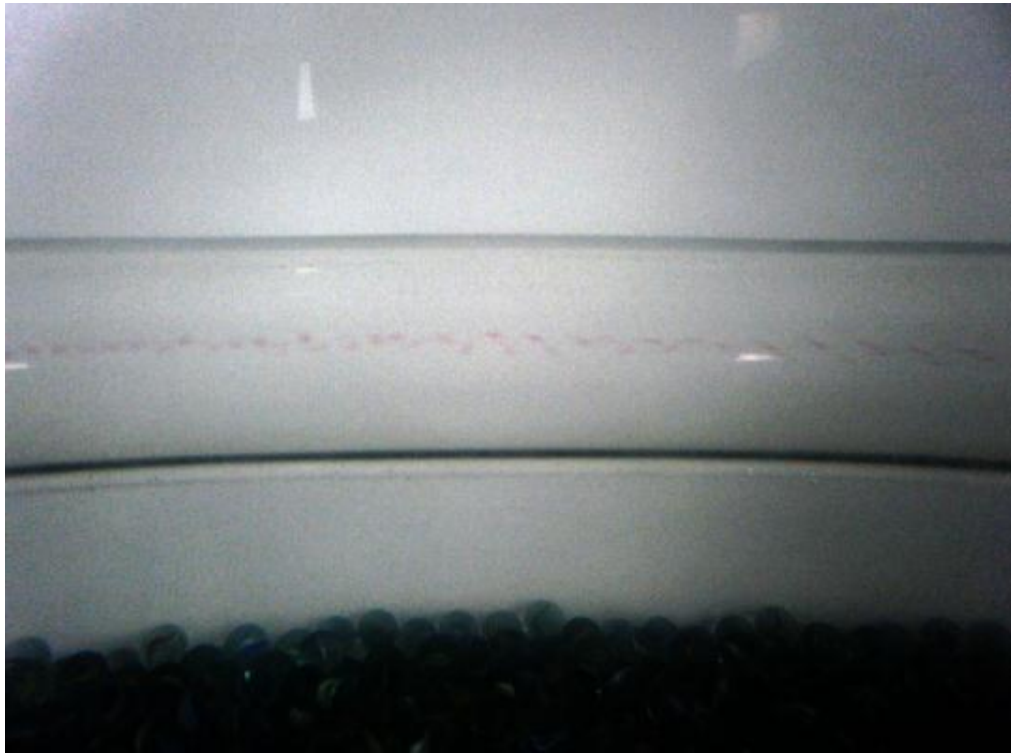
Q = Caudal H = Altura manométrica total Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 App. A.

Fuente: Catalogo PEDROLLO.

ANEXO H. REGISTRO FOTOGRÁFICO







ANEXO I. GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO



PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA EL EXPERIMENTO DE REYNOLDS

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Demostrar en la práctica las diferencias entre los flujos laminar y turbulento.

1.2 Objetivos específicos

- Conocer el experimento realizado en 1883 por Osborne Reynolds.
- Identificar cualitativamente la diferencia entre los regímenes de flujo.
- Calcular los números de Reynolds para los distintos regímenes de flujo.

2. Conceptos fundamentales

El experimento de Reynolds

El ingeniero alemán Gotthilf Hagen (1797-1884) fue el primero en realizar experimentos con flujo interno, utilizando agua con aserrín en una tubería de latón y reportando que el comportamiento del fluido a la salida de la tubería dependía de su diámetro y de la velocidad y temperatura del fluido.

Posteriormente, el profesor británico de ingeniería Osborne Reynolds (1842-1912), luego de terminar su estudio de flujo en medio poroso, realizó experimentos en un montaje especial (Figura 1) para estudiar más a fondo lo encontrado por Hagen para varias temperaturas y diámetros. Fue así como en 1883, reportó la existencia de regímenes de flujo y los clasificó de acuerdo a un parámetro que pudo deducir y que ahora lleva su nombre: *el Número de Reynolds*.

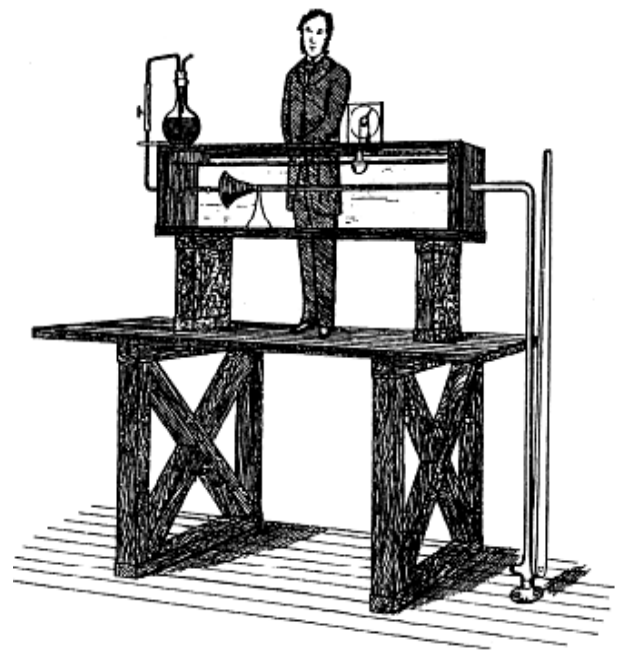


Figura 1. Montaje experimental de Reynolds.

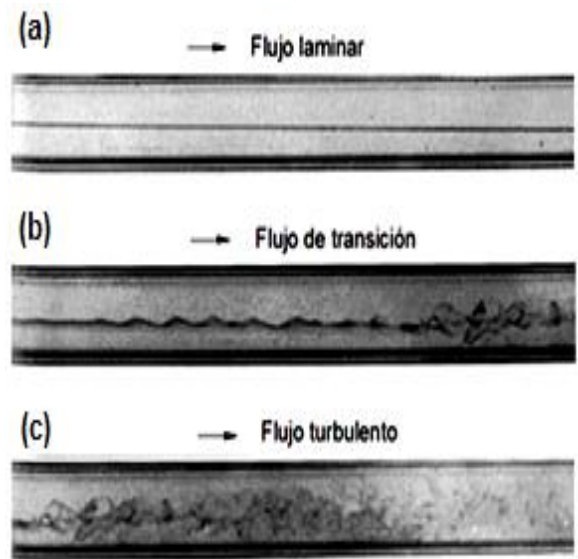
El montaje consistía en un tanque de agua con una tubería de vidrio dentro de la cual inyectó por sifón una fina corriente de tinta, regulando el flujo con una válvula que abría con una palanca larga.

Visualización de los regímenes de flujo

Reynolds observó que el filamento de tinta conservaba su forma a velocidades bajas, mostrando que el agua se movía en líneas de corriente paralelas sin lugar a ninguna mezcla; este es el caso del *Flujo laminar*, aquel donde existe un predominio de las fuerzas viscosas tangenciales sobre las fuerzas de inercia del campo de flujo (Figura 2a).

Al aumentar la velocidad, comenzaban a surgir fluctuaciones en la trayectoria del filamento, lo que demostró que el comportamiento ordenado empezaba a perderse debido a la aceleración del flujo; no obstante, no se desarrollaban aún trayectorias definidas ni completamente erráticas. Este régimen de flujo se denomina *Flujo de Transición* (Figura 2b).

Posteriormente y luego de incrementar aún más la velocidad, el filamento de tinta experimentaba una dispersión completa de forma irregular y aleatoria, dando lugar a mezclas entre capas de fluido. Este caso evidenció el *Flujo turbulento* (Figura 2c), donde los efectos viscosos son mucho menores con respecto a los inerciales.



**Figura 2. Regímenes de flujo.
El número de Reynolds**

Los numerosos ensayos se realizaron variando la velocidad de flujo para un diámetro de tubería constante. Los resultados permitieron deducir el Número de Reynolds, que permite clasificar el tipo de flujo presente en el interior de una tubería según la expresión:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

V = Velocidad media del flujo [m/s].

L = Longitud característica [m].

D = Diámetro de la tubería [m].

μ = Viscosidad dinámica [N.s/m²].

ρ = Densidad del fluido [Kg/m³].

ν = Viscosidad cinemática [m²/s].

La magnitud del Número de Reynolds para cada régimen varía de acuerdo a las condiciones dadas, aunque para propósitos de ingeniería (ya sea diseño

o análisis) se aceptan los siguientes valores:

- Flujo laminar, $Re < 2300$
- Flujo de transición, $2300 < Re < 4000$
- Flujo turbulento, $Re > 4000$

Reynolds encontró que el Flujo de transición se encontraba dentro de un rango: al incrementar la velocidad, el Flujo laminar desaparecía después de una velocidad crítica hasta describir un comportamiento turbulento y al disminuir la velocidad gradualmente, el flujo volvía a ser laminar pero a otra velocidad crítica menor que la primera.

Los Números de Reynolds asociados a estas velocidades se denominan *Número de Reynolds crítico inferior* y *superior*, respectivamente. Este último no es constante pues depende de las características del fluido dentro de la cámara de agua, la geometría de la sección de entrada al tubo y su rugosidad, debido a esto, se ha obtenido un valor de $Re = 50.000$ antes que se desarrollará un flujo totalmente turbulento.

El Número de Reynolds es de gran importancia en el estudio del flujo en tuberías de cualquier sección transversal, así como para el análisis de flujos con proximidades a una superficie sólida que puedan tener superficie libre, sólo seleccionando una longitud característica apropiada según el caso.

3. Descripción de los equipos

El equipo disponible en el Laboratorio de Fluidos e Hidráulica, que se muestra en la Figura 3, es capaz de generar las condiciones para la visualización de los

regímenes de flujo descubiertos por Reynolds.



Figura 3. Equipo para el experimento de Reynolds.

La orientación del tubo de vidrio en este equipo es igual que la utilizada por Osborne Reynolds en el aparato original, donde se utilizó tubería de vidrio en posición horizontal.

Este equipo difiere del original en el diámetro de la tubería y el sistema de recirculación utilizado.

Para la práctica están disponibles los siguientes elementos:

- Termómetro y cronómetros.
- Probetas
- Trazador. Se utiliza una mezcla de tinta vegetal, alcohol y agua, acorde

con técnicas actuales de visualización de flujos. La proporción asegura que su densidad relativa sea prácticamente similar a la del agua.

- Equipo de Reynolds. Consiste en un tanque rectangular de acrílico que es llenado desde su base, donde el agua que entra es amortiguada por un sistema disipador de energía construido en tubos de PVC y un lecho de canicas de vidrio, el exceso sale por el rebosadero en la parte superior. Esto genera una carga constante, el agua entra a la tubería de vidrio abocinada en la entrada (diámetro interno D igual a 40 mm, longitud L igual a 1500 mm).



Figura 4. Esquema general del equipo.

4. Procedimiento

La operación de este equipo es sencilla, para obtener resultados confiables, es importante que el flujo en el tanque y en el interior del tubo de vidrio tengan la menor cantidad de perturbaciones posibles. Siga los siguientes pasos:

- Encienda la bomba, percatándose que la válvula de retorno este parcialmente abierta, gire la llave de descarga en la parte inferior y permita que un pequeño caudal salga, luego abra la válvula de control 1, asegurándose que la válvula de control 2 este cerrada, abra un poco el obturador de la manguera conductora del trazador hasta obtener el filamento de tinta al interior de la tubería de vidrio, espere 15 minutos mientras el equipo estabiliza. Pasado este tiempo abra la válvula de control 2 y cierre totalmente la válvula de control 1.
- Efectúe tres aforos volumétricos para encontrar la velocidad promedio de un *Flujo laminar*.
- Abra de nuevo la llave de descarga para permitir el paso de un flujo mayor y regule la tinta hasta que se observe un movimiento sinusoidal del filamento a una distancia cercana del inyector. Efectúe tres aforos volumétricos para encontrar la velocidad promedio para *Flujo de transición*.
- Permita que un mayor caudal circule por la tubería para obtener un flujo turbulento luego de regular el paso del trazador y asegurarse que la llave de retorno esta totalmente cerrada para evitar una caída de la columna de agua al interior del tanque. Efectúe tres aforos volumétricos para encontrar la velocidad promedio.
- Tome la temperatura del agua y obtenga su viscosidad cinemática en la literatura.
- Registre los datos en la Tabla A1.

5. Informe de laboratorio

El informe debe contener los siguientes puntos:

- Nombre.
- Introducción.
- Objetivos.
- Descripción detallada de la práctica.
- Datos y cálculos:
 - Calcule el Número de Reynolds para cada régimen según el filamento de tinta.
 - Análisis de resultados y preguntas complementarias:
 - ¿Cuáles son los dos efectos que están relacionados en el Número de Reynolds?
 - Compare los resultados con los valores aceptados. ¿Qué motivos pueden justificar la diferencia?
 - ¿En qué situaciones reales se podrían encontrar los diferentes tipos de regímenes de flujo?
- Conclusiones.
- Bibliografía.

6. Referencias

CENGEL, Y., CIMBALA, J. 2007. Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones. McGraw-Hill Interamericana. México D. F.

NAKAYAMA, Y. 1998. Introduction to Fluid Mechanics. Butterworth-Heinemann.

SALDARRIAGA, J. 2001. Hidráulica de tuberías. 1a ed. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá.

STREETER, V. 2000. Mecánica de fluidos. 9a ed. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá.

WHITE, F. 2004. Mecánica de Fluidos. 5a ed. McGraw-Hill. Madrid.

ANEXO

Tabla A1. Registro de datos

ENSAYO	Régimen de Flujo	Volumen [ml]			Tiempo [s]		
		1	2	3	1	2	3
1	Laminar						
2							
3							
4	Transición						
5							
6							
7	Turbulento						
8							
9							
Temperatura [°C]							
Viscosidad cinemática [m²/s]							